

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

МІНІЦЬКИЙ АНАТОЛІЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ



УДК 621.762.4.04

**СТВОРЕННЯ ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОСНОВ ВИГОТОВЛЕННЯ
ВИСОКОЩІЛЬНИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.16.06 – «Порошкова металургія та композиційні матеріали»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Науковий керівник: Чл.-кор НАН України, доктор технічних наук, професор
Лобода Петро Іванович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», професор кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії

Офіційні опоненти: Чл.-кор НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Штерн Михайло Борисович,
Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, завідувач відділу реологічних і фізико-хімічних основ порошкових технологій

доктор технічних наук, професор
Санін Анатолій Федорович,
Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара МОН України, завідувач кафедри технології виробництва літальних апаратів

доктор технічних наук, професор
Сизоненко Ольга Миколаївна,
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, в.о. завідувача відділу імпульсної обробки дисперсних систем

Захист відбудеться « 02 лютого » 2021 р. о 10³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.12 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. №9, ауд. 101

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І.Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги, 37, НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Автореферат розісланий « 24 грудня » 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.12
кандидат технічних наук



Степанов О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Ресурсно-економічні реалії сьогодення диктують виробникам необхідність відмови від дефіцитних легуючих матеріалів, а також застосування економічно-рентабельних технологій без використання високоенергетичних методів виробництва. На сьогодні основним конструкційним матеріалом залишається сталь і сплави на основі заліза. Методи порошкової металургії дозволяють в більш широкому діапазоні, порівняно із відомими, керувати розмірами зерен (10 нм – 100 мкм), фазовим та хімічним складом матеріалів і є енерго- та ресурсозберігаючими через найбільший коефіцієнт використання металу. Основною проблемою порошкових матеріалів є низька міцність порівняно із прокатаним металом, через залишкову пористість та значну концентрацію адсорбованих та хемосорбованих домішок по границях зерен через високу газонасиченість порошків.

Одним із способів комбінованої обробки порошкових пресовок, що дозволяє сумістити спікання з обробкою тиском є кування. Але процеси підготовки пресовок до інтенсивного ущільнення під час кування, формування структури та властивостей матеріалів в залежності від природи вихідних порошків, їх фізичних технологічних та хімічних властивостей вивчені не достатньо повно. Ефективність підвищення щільності, міцності та експлуатаційних характеристик матеріалів із порошків заліза, визначається сукупністю технологічних та економічних факторів.

На сьогодні основним способом виробництва порошкових виробів залишається статичне пресування у жорстких матрицях. Питанням консолідації порошкових систем в умовах статичного пресування присвячено фундаментальні роботи таких вчених як Walker E.E., Бальшин М.Ю., Jones W.D., Seelig R.P., Жданович Г.М., Анциферов В.Н., Перельман В.Е., Скороход В.В., Штерн М.Б., SchattW. тощо. Іншою групою методів консолідації, що забезпечують високі значення фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів є технології, які базуються на термодеоформаційному обробленні. Науково-технологічні основи термодеоформаційного оброблення створені завдяки роботам Ковальченка М.С., Дорофєєва Ю.Г, Баглюка, Г.А. та ін. Перспективними способами створення матеріалів з дрібнодисперсними, нерівноважними структурами є методи інтенсивної пластичної деформації, основний вклад в розвиток цих методів внесли Бриджмен П.У., Сегал В.М., Валієв Р.З., Бейгельзімер Я.Є. та ін.

Переважає більшість робіт присвячена впливу сил внутрішнього та зовнішнього тертя на формування структури порошкових матеріалів та утворення

залишкової пористості. При цьому, залишаються не повністю з'ясованими питання впливу природи матеріалу частинок, хімічні, фізичні та технологічні властивості порошків, а також схеми прикладання навантаження на ущільнення під час пресування.

При цьому, реалізація на практиці технологій виготовлення дрібнозернистих високощільних матеріалів із порошків заліза та його сплавів має цілий ряд обмежень в застосуванні. Не випадково останнім часом з'явилися адитивні технології пошарового 3D друку, за допомогою яких можна отримати дрібнозернисті матеріали з достатньо чистими по відношенню до домішок границями зерен. Але, швидкість процесу 3D друку, високі капітальні витрати на обладнання, високі термомеханічні напруження, що призводять до необхідності додаткової операції термообробки виробу, не дозволяють реалізувати швидкісне компактування порошкових матеріалів. Найбільш швидким способом може бути кування, але процеси формування мікроструктури, фазового складу, розподілу домішок, їх вплив на фізико-хімічні властивості сплавів на основі заліза вивчені не достатньо. Окрім того із порошків заліза методами 3D друку можна формувати каркас майбутньої деталі, з високою пористістю і таким чином скоротити час на надання форми порошковому тілу, а на другій стадії шляхом інфільтрації розплаву із компоненту, що може виступати легуючим для сплаву заліза формувати виріб зі сплаву з високими фізико-механічними характеристиками.

Тому, створення науково-технологічних основ виготовлення виробів із високощільних легованих сталей та металокерамічних матеріалів шляхом термодетонаційної обробки та інфільтрації пресовок із порошків заліза та його сумішей з легуючими компонентами є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконана на кафедрі високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України ім. Ігоря Сікорського в рамках бюджетної теми №2106п «Створення проривних технологій виробництва деталей складної форми з композиційних матеріалів для екстремальних умов експлуатації» (державний реєстраційний номер № 0118U000222).

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є вирішення прикладної проблеми виготовлення високощільних економнолегованих порошкових матеріалів на основі заліза з високими фізико-механічними характеристиками для роботи в екстремальних умовах експлуатації, шляхом створення фізико-технологічних основ консолідації порошків.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

1. Встановити вплив природи покриттів із міді та кобальту на хімічні, фізичні та технологічні властивості порошку заліза та процеси їх ущільнення в умовах статичного пресування.

2. Дослідити параметри процесу допресування, що впливають на ступінь консолідації сумішей порошків заліза з добавками частинок порошків графіту та твердих непластичних карбіду хрому, гідриду титану та гетерогенних сумішей порошків твердих сплавів (ВК, КХН), що складаються з частинок порошку пластичної та твердої крихкої складової і встановити основні фактори, що визначають ефективність процесу консолідації пресовок.

3. Проаналізувати можливість розробки гібридних схем ущільнення порошкових пресовок шляхом встановлення закономірностей формування мікроструктури пресовок під час пресування порошків заліза в камері високого тиску та в процесі вільного осаджування.

4. Встановити вплив параметрів процесів на ступінь ущільнення, сплавоутворення, формування мікроструктури та властивостей порошкових матеріалів на основі заліза в умовах комплексного термодетонаційного оброблення.

5. Дослідити закономірності формування мікроструктури та властивостей капілярно-пористих тіл, сформованих за технологією селективного лазерного оплавлення, що супроводжується рафінуванням матеріалу частинок порошку та формування найбільш фізично та хімічно досконалих границь зерен порошкової сталі.

6. Дослідити вплив геометричних характеристик та орієнтації в просторі стінок пор заготовок, сформованих із порошку заліза шляхом селективного лазерного оплавлення на характеристики пружності та міцності капілярно-пористих тіл.

7. Дослідити закономірності еволюції мікроструктури капілярно-пористого тіла із порошку заліза під час інфільтрації розплавом алюмінію та встановити вплив параметрів процесу термооброблення на мікроструктуру та властивості композиту.

8. Розробити наукові основи технологічних процесів одержання порошкових високощільних економнолегованих сталей та композитів на їх основі шляхом комплексного термооброблення порошків.

Об'єкт дослідження – процеси одержання високощільних композиційних матеріалів на основі порошків заліза для роботи в високонавантажених вузлах та механізмах сучасної техніки.

Предмет дослідження – закономірності формування мікроструктури, фазового складу та властивостей порошкових сталей та каркасних композитів із них.

Методи дослідження: оптична та скануюча електронна мікроскопія, гранулометричний, рентгенофлюорисцентний, мікрорентгеноспектральний, рентгеноструктурний аналіз, спекл-інтерферометрія, наноіндентування, стандартні методики визначення механічних властивостей (міцність на стиснення, міцність на згин, міцність на розтяг, ударна в'язкість), твердості, мікротвердості, питомого електричного опору, магнітних властивостей (магнітна індукція, коерцитивна сила, питома намагніченість, магнітна проникність, загальні магнітні втрати).

Процеси моделювання проводили методом скінчених елементів за допомогою прикладних програмних пакетів ANSYS 19R1 AcademicEdition та DEFORM 2D/3D.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Встановлено вплив хімічного складу покриття (мідь, кобальт) на здатність до ущільнення порошків заліза, формування високощільної мікроструктури і властивостей безпористих порошкових матеріалів. Аналізом процесу ущільнення за рівняннями Куніна-Юрченко, Бальшина, Ждановича, Штерна доведено, що активація ущільнення порошків з покриттям обумовлена збільшенням пластичності (у випадку міді) поверхневих шарів частинок порошку, що забезпечують їх проковзування без суттєвої об'ємної деформації.

2. Встановлено закономірності впливу розміру і хімічного складу порошків та мастила на процес ущільнення порошкових матеріалів на основі заліза в умовах допресування, що дозволяє керувати величиною внутрішнього та зовнішнього тертя і збільшити на 20 – 30 % щільність пресовок. Доведено, що допресування порошку заліза з добавками графіту не тільки зменшує пористість, але і збільшує до 5 разів міцність пресовок, що обумовлено збільшенням площі міжчастинкових контактів, внаслідок подрібнення крупних частинок порошку заліза.

3. Вперше встановлено можливість створення високощільних та високоміцних порошкових середньо- та високовуглецевих сталей та залізграфітових матеріалів вільним осадженням без спікання шляхом реалізації деформацій зсуву під час ущільнення та виключенням зовнішнього тертя при формуванні.

4. Вперше встановлено, що високощільні порошкові матеріали систем Fe-C, Fe-Ti-C, Fe-Si-Cr та ін. можуть формуватися в умовах термодифузійного

оброблення, поєднавши процеси структурної деформації частинок порошку та фізико-хімічної взаємодії компонентів пресовки. Вперше доведено, що реалізація процесів деформації та сплавоутворення під час торцевого вільного кування дозволяє отримувати високощільні та високоміцні композиційні матеріали із порошкових сумішей і, навіть, відходів металообробки ШХ15.

5. Вперше встановлені технологічні параметри процесу інфільтрації розплаву алюмінію в пресовки заліза. Доведено, що зі збільшенням розміру пор, швидкість просочування зростає і при розмірі пор порядку 400 мкм забезпечується повне просочування пресовок на висоту до 30 мм в умовах градієнту тиску.

6. Формування каркасу із порошку заліза в умовах 3D друку забезпечує створення хімічно та фізично досконалих міжзеренних границь, що забезпечує найвищі значення міцності та дозволяє керувати пружними та механічними характеристиками композиційного матеріалу шляхом орієнтування в просторі порових каналів каркасу.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено нові способи отримання економно легованих високощільних порошкових матеріалів з використанням методів термодетонаційного оброблення та інфільтрації пористих каркасів.

Створено магнітні матеріали на основі композиційних порошоків для роботи у змінних полях промислової частоти, що мають низькі втрати при перемагнічуванні при збереженні високих значень магнітних характеристик.

Розроблено матеріали для високоструменевих контактів на основі відходів металообробки важких сплавів просочених міддю, що мають ерозійну стійкість на рівні промислових псевдосплавів (ООО «Інтер-контакт-пріор»).

Відпрацьовано технологію отримання твердосплавних сердечників, що пройшли балістичні випробування і підтвердили можливість застосовування для виробництва бронебійних боєприпасів стрілецької зброї калібром 7,62 мм (ТОВ «Стілетто Україна»)

Розроблені порошкові матеріали, одержані в результаті виконання дисертаційної роботи, можуть широко використовуватися в якості конструкційних, триботехнічних, електротехнічних та матеріалів спеціального призначення, що працюють в екстремальних умовах експлуатації.

Особистий внесок здобувача. Дисертація виконана автором самостійно і базується на результатах досліджень, що опубліковані. Основні наукові положення дисертаційної роботи сформульовані автором особисто. Матеріали дисертаційної роботи не містять ідей та розробок, що належать співавторам.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати дисертаційної роботи апробовано на конференціях: Порошковая металлургия в автотракторном машиностроении. Сварка и резка материалов. Материалы, технологии и оборудование для нанесения функциональных защитных покрытий, 2007 г., Минск, Беларусь, Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress&Exhibition Euro PM2007, Toulouse, France, Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, Euro PM 2008, Shrewsbury, England, Пятая международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях», 2008 р., Крим, Україна, Міжнародна науково-технічна конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах», 2008, 2010, 2012, 2017, 2018 р., Київ Україна, Международный симпозиум, проведенный в рамках 12-й международной выставки «Порошковая металлургия-2009», Минск, Беларусь, International Conference on Sintering 2009, Kyiv, Ukraine, Міжнародна конференція «Электрические контакты и электроды», 2009, Крим, Україна, Международная конференция «HighMatTech», 2009, 2015, 2019 Київ, Україна, Міжнародна Науково-практична конференція «Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології», 2012, 2013 р., м. Маріуполь, Україна, VII-ая научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии», 2013 р, Ворзель, Україна, Международная научно-техническая конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении», 2013, 2014, 2017, 2018, 2019 р, Київ, Україна, Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 2014, 2015 р., Херсон, Україна, Международная конференция «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», 2016, 2018 р., Київ, Україна, Международная научно – практическая конференция «Реологические модели и процессы деформирования структурно – неоднородных материалов», 2016 г, Луцьк, Україна, Международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», 2016 г., Кoblevo, Украина, Міжнародно науково-практична конференція «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: теоретические и экспериментальные основы технологий изготовления», 2017 р, Луцьк, Україна, Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту», 2018 р., Харків, Україна, international conference “Advanced materials and technologies: from idea to market”, 2018, Ningbo, China, Міжнародна науково-технічна конференція «Нові сталі і сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів», 2019 Запоріжжя, Україна, Міжнародна

науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», 2019, Харків, Україна, VIII міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки ("Зброя та безпека - 2020").

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано **52** наукові праці, в тому числі в **28** статтях у наукових фахових виданнях (з них – **8** статей у виданнях які включені до міжнародних наукометричних баз), **3** патенти України на корисну модель, **21** теза доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, **6** розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Викладена на **369** сторінках, включає **52** таблиці, **165** рисунків, додатки, список використаних джерел із **334** найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації та доцільність її виконання, сформульовано мету та задачі досліджень, об'єкт і предмет дослідження, відзначено наукову новизну роботи, її практичну значимість, наведено дані щодо апробації та основні публікації роботи.

У **першому розділі** проаналізовано основні підходи щодо створення високощільних порошкових матеріалів на основі заліза.

Показано вплив характеристик порошків на процеси консолідації матеріалів на основі заліза. Проаналізовано основні способи зміни фізико-технологічних властивостей залізного порошку, що визначає ступінь його ущільнення. Показано, що одним з перспективних способів зміни фізичних, хімічних та технологічних властивостей порошків є нанесення покриття на їх поверхню методом хімічного осадження. Однак, не дивлячись на безперечні переваги даного методу, відсутні систематичні дані та чіткі рецептури по плакуванню залізних порошків металевими компонентами, що обумовлює необхідність проведення таких досліджень.

Показано вплив мастила та природи легуючих добавок на процеси ущільнення порошкових матеріалів. Здатність мастил до зниження зовнішнього контактного тертя і міжчастинкової взаємодії може бути симбатна їхній в'язкості. Саме тому найбільш перспективними мастилами, що використовуються для введення у порошок є в'язкі речовини, які не змінюють свої реологічні властивості в процесі ущільнення.

Одним із способів, що дозволяє збільшити щільність порошкових заготовок є застосування операцій повторної деформації, до яких відносяться статичне

допресування, штампування, ізостатичне та динамічне пресування. Аналіз відомих літературних даних дозволяє припустити, що існує принципова можливість підвищення ущільнюваності порошків за допомогою удосконалення схем навантаження з використанням зсуву при пресуванні сумішей, що мають понижений вміст мастила яке видаляється при нагріві.

Одними із перспективних методів виготовлення конструкційних матеріалів, які дозволяють отримувати дрібнозернисту структуру та високі фізико-механічні властивості є технології інтенсивної пластичної деформації (ІПД). Загальним недоліком методів ІПД є обмеження по конфігурації виробів, особливо при створенні деталей точної форми та розмірів.

Критичний аналіз світової літератури свідчить, що інформація стосовно застосування схем інтенсивної пластичної деформації для порошкових композиційних матеріалів є обмеженою. При цьому, застосування гарячого кування порошкових матеріалів може забезпечити створення нерівноважних структур з подрібненим зерном, що досягається за рахунок реалізації механізму одночасної дії нормальної деформації та деформації зсуву.

Показано, що інфільтрація пористих каркасів є ефективним способом отримання композитів з високим рівнем фізико-механічних властивостей, що обумовлено можливістю керування складом, структурою та формою готових виробів.

Аналіз інформації, що стосується ущільнення порошкових систем, визначив різні підходи, що забезпечують отримання безпористих металевих та металокерамічних матеріалів з високими фізико-механічними властивостями. Основні напрямки, що застосовуються сьогодні в порошковій металургії, для забезпечення високощільних матеріалів різного функціонального призначення, здатних працювати в екстремальних умовах експлуатації, тобто мають необхідним комплексом характеристик міцності, твердості та іншими спеціальними властивостями, полягають у забезпеченні високої якості порошків і застосуванні нових технологічних рішень консолідації.

У **другому розділі** викладено результати експериментальних досліджень процесу плакування залізного порошку міддю та кобальтом з метою вивчення впливу внутрішнього тертя на процес ущільнення. Спочатку було змінено внутрішнє тертя частинок шляхом плакування залізного порошку міддю. Оскільки внутрішнє тертя залежить від форми, розміру та природи поверхневого шару було досліджено кінетику процесу хімічного осадження покриття на частинки залізного

порошку (рис.1), що визначає зміну форми та розмірів порошків і, відповідно, зміну їх технологічних характеристик (рис.2).

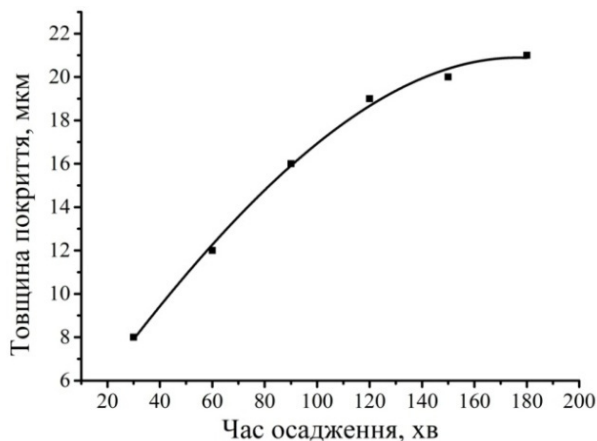
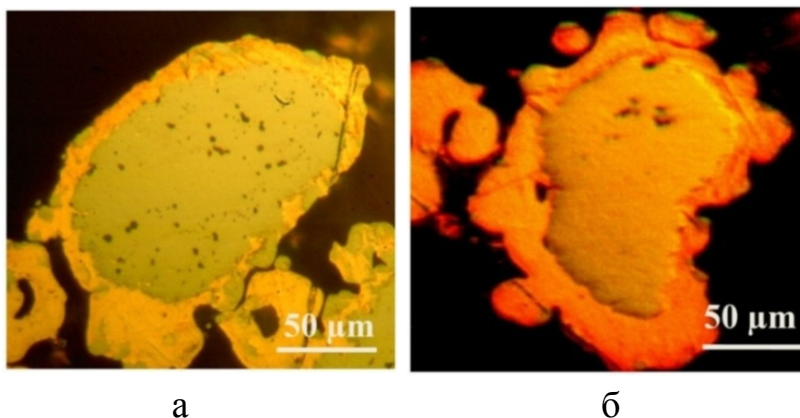


Рисунок 1 – Вплив кінетики процесу осадження на товщину покриття міді на частинки залізного порошку

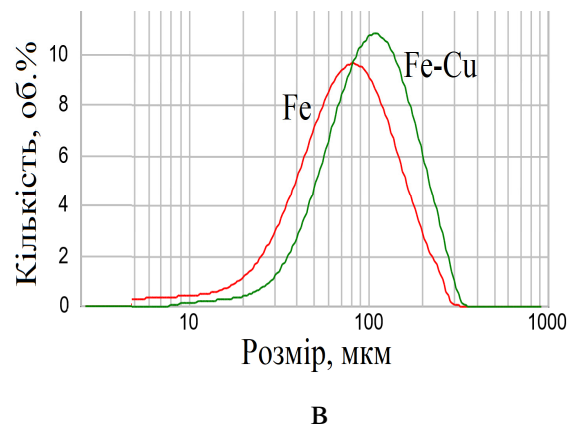
Плакування частинок залізного порошку приводить до зміни їх форми, що підтверджують результати металографічного аналізу (рис. 2). Дослідження кінетики процесу осадження показало, що після 60 хв товщина покриття складає 12–15 мкм, збільшення часу до 120 хв приводить до зростання шару покриття до 18–22 мкм. Зміна фізичних характеристик залізного порошку визначає характер його ущільнюваності в процесі статичного

пресування, що обумовлює створення компактних пресовок з низькою пористістю і, відповідно, з високою технологічною міцністю.



а

б



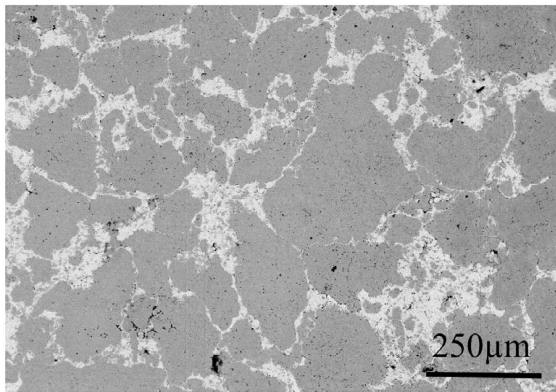
в

Рисунок 2 – Структура частинок залізного порошку плакованого міддю після різного часу осадження: а – 60 хв, б – 120 хв та гранулометричний склад вихідного залізного порошку та плакованого міддю(в)

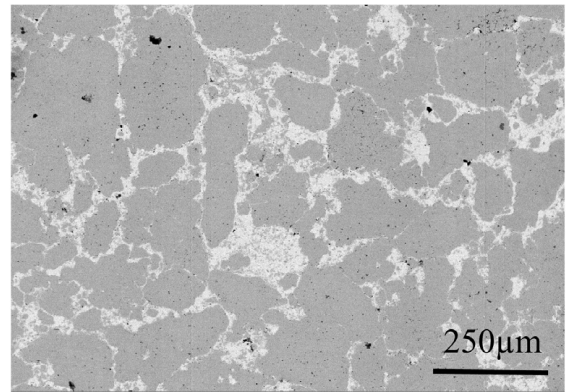
Для визначення впливу плакування міддю на ущільнюваність заліза було проведено повторну деформація порошкових брикетів шляхом їх статичного допресування у розбірній прес-формі при одному тиску 800 МПа. Встановлено, що допресування пресовок приводить до зменшення загальної пористості матеріалу до 11–13 %.

Аналіз структури зразків отриманих із композиційного порошку показав, що після пресування спостерігається консолідація частинок залізного порошку, оточених шаром мідного покриття (рис. 3). При цьому, як пресування, так і

допресування не приводять до руйнування покриття міді, яке зберігає суцільний шар навколо частинок заліза.



а



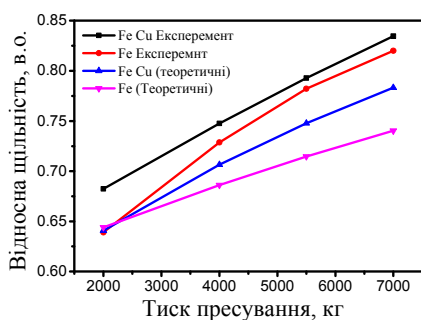
б

Рисунок 3 – Мікроструктура зразків на основі залізного порошку плакованого міддю: а – після пресування при 800 МПа; б – після допресування при 800 МПа

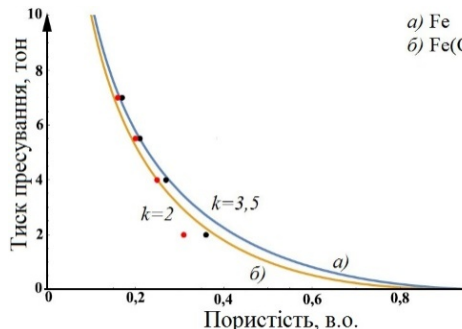
На основні аналізу основних теоретичних положень, що описують процеси деформації пористого тіла, як залежність щільності від тиску пресування, було встановлено відмінність характеру ущільненості плакованих порошків. Аналіз рівняння Куніна – Юрченко показав наявність переходів від пружної до пластичної деформації у чистому залізі та їх відсутність для плакованих порошків, що обумовлено перевагою механізму пластичної деформації (рис. 4 а).

Аналогічну залежність можна спостерігати і при аналізі рівняння Ждановича: зменшення максимального тиску підтверджують збільшення пластичності плакованих порошків (рис. 4б).

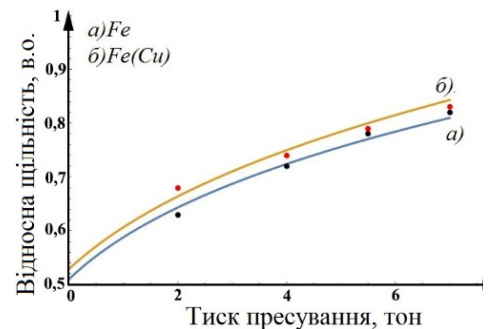
Враховуючи, що структура із плакованих порошків характеризується своєю однорідністю та суцільністю, було проаналізовано ущільнення з позиції континуальної теорії, що описується рівнянням Штерна (рис. 4 в).



а)



б)



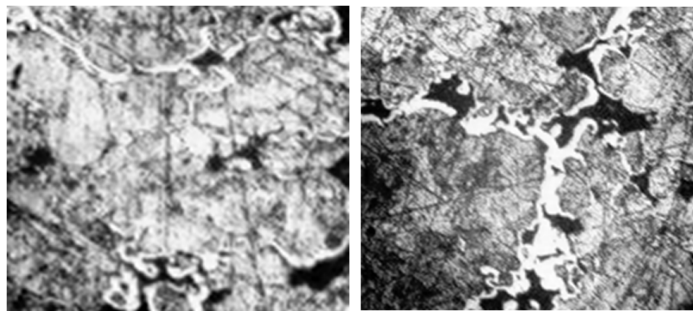
в)

Рисунок 4 – Теоретичні і експериментальні залежності за Куніном-Юрченко (а) та Г.М.Ждановичем (б) та графічне розв'язання за Штерном М.Б. (в) для залізних та композиційних порошків

Як видно, на хід кривої впливає зміна параметру k , який в своє чергу є функцією механічних властивостей порошку, тобто збільшення пластичності поверхневого шару приводить до збільшення ущільнення залізного порошку.

Вплив зміни пластичності поверхневого шару на ущільнення залізного порошку було досліджено шляхом нанесення твердого покриття кобальту на частинки порошку. Встановлено, що збільшення товщини шару твердого покриття приводить до зменшення ущільненості залізного порошку.

Така залежність може пояснюватись тим, що більший шар покриття перешкоджає ущільненню залізного порошку, що пов'язано із зниженням пластичності композиційного порошку, і, відповідно, ускладнюється деформація частинок залізного порошку. Таким чином, на етапі пресування збільшення шару покриття Со-Р приводить до деякого збільшення пористості зразків, що підтверджують металографічні дослідження (рис. 5).



а

б

Рисунок 6 – Пресовки із залізного порошку з покриттям кобальт-фосфор, спресовані при тиску 800 МПа: а – 12 мкм, б – 18 мкм.

Підвищення температури спікання до 1200 °С і часу витримки до 3 годин дозволяє здійснити гомогенізацію матеріалу і приводить до більш рівномірного розподілення кобальту в розчині.

Плакування залізного порошку кобальтом приводить до суттєвого підвищення електричного опору матеріалу з 10 – 13 мкОм·см до 30 – 40 мкОм·см. Відповідно зміна питомого електричного опору визначає зміну загальних магнітних втрат при перемагнічуванні (табл. 1).

Результати вимірювань показують, що підвищення температури спікання до 1200 °С суттєво впливає на щільність та магнітні властивості отриманих матеріалів. Разом з цим не спостерігається помітного впливу часу витримки в межах 1 і 2 години при 1100 і 1200 °С.

Контроль стадії ущільненості залізних порошків на етапі пресування дозволяє регулювати структуроутворення матеріалів на стадії спікання (рис. 6).

Кінетика процесу спікання дозволяє формувати структуру із необхідним рівнем магнітних та електричних властивостей матеріалів.

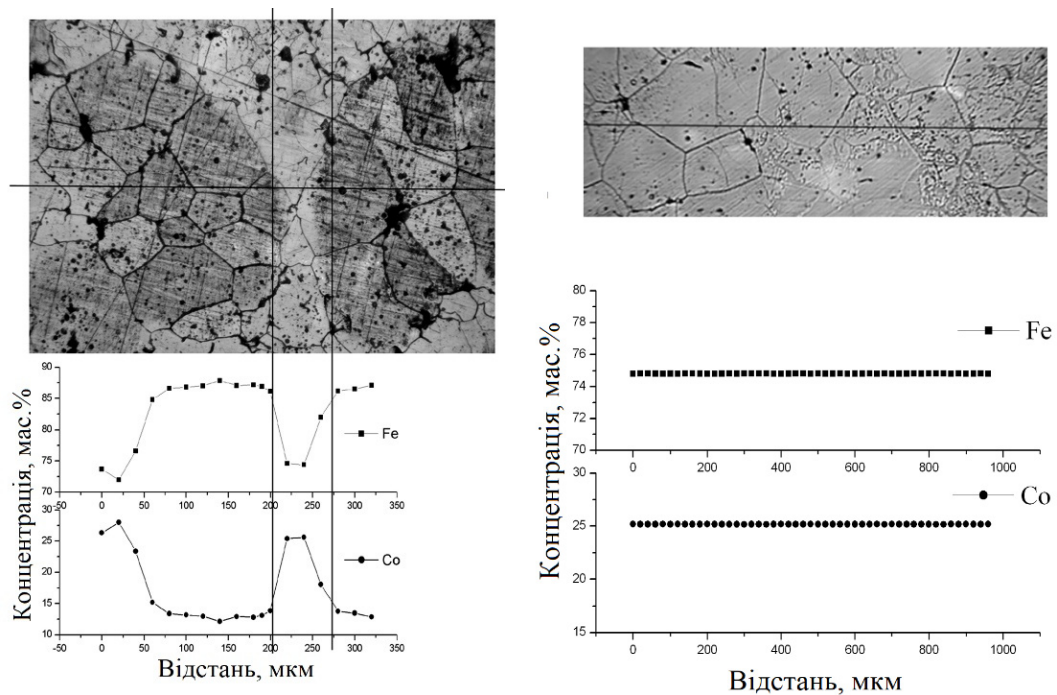


Рисунок 6 – Розподіл заліза та кобальту матеріалу на основі заліза покритого Со після спікання у вакуумі при температурі: 1200 °С, за різним часом ізотермічної витримки: а – 1 година, б – 3 години.

Підвищення витримки до 3-х годин приводить до суттєвого росту щільності, зростання магнітної індукції в 1,5 рази і магнітної проникності в 2 рази. Одночасно з цим показано несуттєвий вплив режимів спікання на величину магнітних втрат при суттєвому впливі складу композиту.

Таблиця 1 – Вплив режимів спікання на щільність та магнітні властивості матеріалів на основі композиційних порошків спечених у вакуумі

Склад	Індукція, Тл	Макс. магнітна проникність	Щільність, г/см ³	Втрати $P_{1/50}$, Вт/кг
Температура 1200 °С, 1 год				
Fe	1,35	2720	7,15	41,24
Fe-Co-P	1,06	685	6,8	21,20
Температура 1200 °С, 2 год				
Fe	1,315	3000	7,16	36,64
Fe-Co-P	1,29	1050	6,72	20,92
Температура 1200 °С, 3 год				
Fe	1,364	3604	7,23	36,24
Fe-Co-P	1,533	1337	7,29	19,92

Відповідно було одержано магнітно-м'який матеріал, властивості якого дозволяють використовувати його для деталей магнітопроводів, що працюють у змінних полях промислової частоти.

У **третьому розділі** наведено результати впливу умов навантаження, природи та фізичних властивостей порошків на ступінь ущільнення під час пресування та допресування. Вивчався вплив зовнішнього та внутрішнього тертя на процес консолідації пресовок на основі заліза. Встановлено, що збільшення пластичності порошку приводить до більшого приросту щільності пресовок порівняно із зниженням зовнішнього контактного тертя шляхом нанесення мастила (рис. 7).

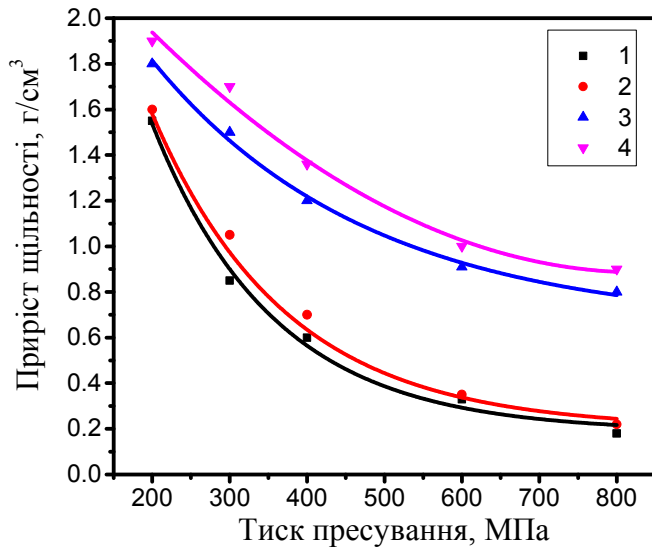
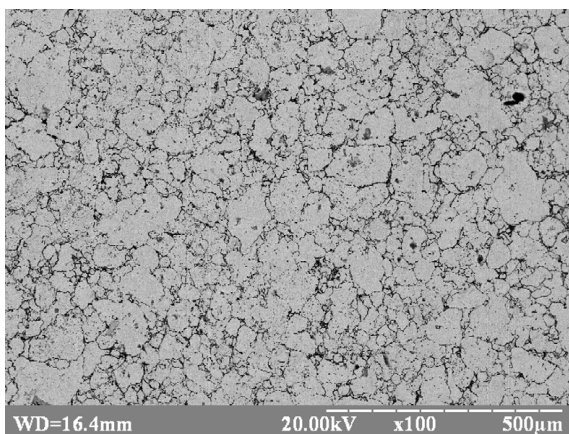
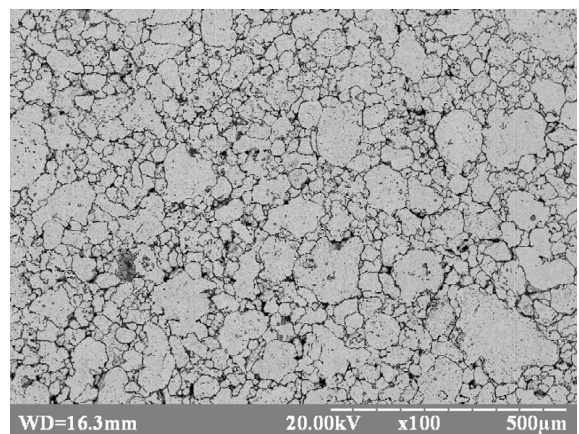


Рисунок 7 – Приріст щільності залізних пресовок: 1 - без відпалу без змащення, 2 - без відпалу з мастилом, 3 - з відпалом без змащення, 4 - з відпалом з мастилом

Наведені дані свідчать про те, що відпал брикетів дозволяє значно збільшити їх щільність за допомогою допресовки. Заміна відпалу брикету його попередніми спіканням недоцільно, не тільки з економічних міркувань; а також через утворення шийок між частинками, що перешкоджає їх більш щільному переукладанню при допресуванні. Встановлено, що ущільнення пресовок із меншою пластичністю відбувається за рахунок подрібнення частинок (рис. 8), що мають більш високі напруження в місцях контактів.



а



б

Рисунок 8 – Мікроструктура залізних пресовок: а – після пресування при 700 МПа, б – після пресування та допресування при 700 МПа

Збільшення напруженого стану після допресування підтверджується результатами визначення залишкових мікронапружень (табл. 2). Як показали результати вимірювання залишкових мікронапружень, допресування приводить до

їх збільшення, що пояснюється процесами деформаційного зміцнення та наклепу. Відпал пресовок закономірно приводить до релаксації напружень, допресування після відпалу знову приводить до збільшення мікронапружень матеріалу.

Таблиця 2 – Залишкові мікронапруження в залізних пресовках

Вид обробки	Залишкові мікронапруження, МПа	
	Метод Стокса-Вільсона	Метод спекл-інтерферометрії
Пресування при 700 МПа	-220 (± 106)	-23-25
Пресування та допресування при 700 МПа	-250 (± 114)	-28-32
Пресування та відпал при 800 °С	-180 (± 112)	-11-13
Пресування, відпал при 800 °С та допресування при 700 МПа	-330 (± 165)	-34-42

Збільшення площі контактів в процесі допресування, підтверджується результатами вимірювань магнітних та електричних властивостей пресовок (табл.3). Допресування приводить до збільшення коерцитивної сили та зниження залишкової намагніченості, що обумовлено як зменшенням розміру зерен так і збільшенням мікронапружень.

Таблиця 3 – Коерцитивна сила, залишкова намагніченість та питомий електричний опір в залізних пресовках

Вид обробки	Коерцитивна сила, А/м	Залишкова намагніченість, Гс	Питомий електричний опір, мкОм·см
Пресування при 700 МПа	400	430	670
Пресування та допресування при 700 МПа	480	120	250
Пресування та відпал у водні при 800 °С	316	690	35
Пресування, відпал у водні при 800 °С та допресування при 700 МПа	474	230	31
Пресування та відпал у вакуумі при 800 °С	390	530	246
Пресування, відпал у вакуумі при 800 °С та допресування при 700 МПа	474	200	230

В свою чергу відпал у водні приводить до зниження коерцитивної сили, що обумовлено як зменшенням напруженого стану так і рафінуванням поверхні міжзеренних границь, що підтверджує зниження питомого електричного опору матеріалу.

Підвищення пластичності порошків шляхом проведення відпалу, забезпечує збільшення площі контактів між частинкам, що визначає збільшення механічних характеристик пресовок до 820 – 824 МПа (табл. 4).

Охолодження пресовок в рідкому азоті приводить до зниження пластичності матеріалу, що характерно для металів з ОЦК-граткою, тому окрихчення матеріалу привело до подрібнення зерен при допресуванні і не забезпечило збільшення міцності.

Таблиця 4 – Механічні властивості залізних пресовок

Вид обробки	Твердість, HRB	Межа плинності, МПа	Межа міцності при стисненні, МПа	Відн. деформ., %
Пресування при 700 МПа	30-32	230-233	270-271	4,25
Пресування та допресування при 700 МПа	40-43	342-346	370-372	5,16
Пресування та відпал у водні при 800 °С	20-23	—	—	—
Пресування, відпал у водні при 800 °С та допресування при 700 МПа	60-62	350-352	820-824	42,22
Пресування, охолодження в рідкому азоті при - 196 °С та допресування при 700 МПа	48-50	302-306	318-320	1,96

З метою зниження внутрішнього тертя між частинками залізного порошку було досліджено вплив добавок графіту на ущільнення пресовок. Встановлено, що зниження міжчастинкового тертя знижує пористість при допресуванні до 5- 6 % (рис. 9).

Вивчення впливу природи легуючих добавок на ущільнення залізних порошків, показало, що добавки які знижують внутрішнє тертя забезпечують мінімальну пористість вже при одностадійному пресуванні (рис. 10 а) та збільшують площу контактів після допресування, що підтверджує зростання міцності сирих пресовок в 5 разів (рис. 10 б).

Отримані результати показали, перспективність допресовки відпалених пресовок із сумішей на основі порошку заліза, що містять 1,0 - 3,0 мас.% графіту для досягнення ними пористості 2 - 5%. Стан закритої пористості брикетів знижує вимоги до їх захисту від окислення при спіканні. Це може створити додаткові умови необхідні для випуску широкої номенклатури і значного тоннажу середньонавантажених виробів без використання дорогих і дефіцитних легуючих

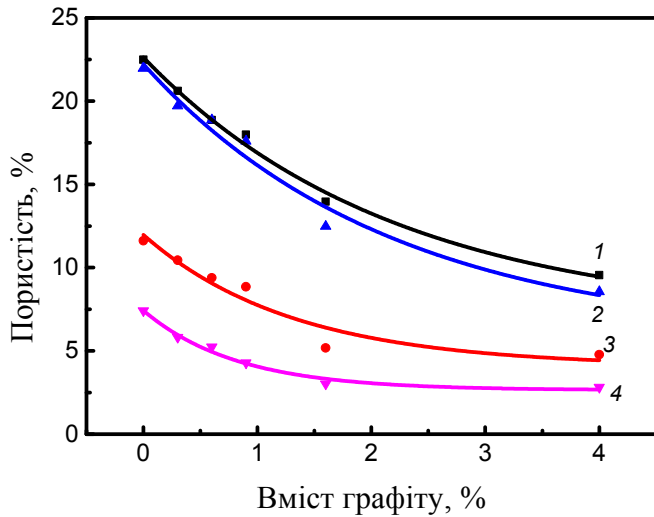


Рисунок 9 – Залежність пористості від вмісту графіту пресовок на основі залізного порошку: 1 - спресовані при 700 МПа, 2 - відпалені при 800 °С, 3 - допресовані при 700 МПа, 4 - відпалені при 800 °С і допресовані при 700 МПа

Значне збільшення міцності без зміни пористості (для суміші №3 з 4 % графіту) обумовлено тим, що при допресуванні пресовки в тій же самій прес-формі змінюється її диспозиція-розташування по відношенню до прес-формі і пуансонів, тобто при допресуванні виникає нова епюра тисків пресування, яка змінює зональний розподіл тисків, і відповідно ділянок утворення дефектів упаковки частинок. Разом із введенням пластичних добавок, що знижують міжчастинкове тертя додавались тверді добавки (Cr_3C_2), що дозволяло вивчити закономірності ущільнення гетерогенних сумішей, які містять пластичні і тверді складові.

Зростання пористості при введенні добавок карбіду хрому обумовлено як зниженням пластичності суміші, так і впливом гранулометричного складу порошку добавки.

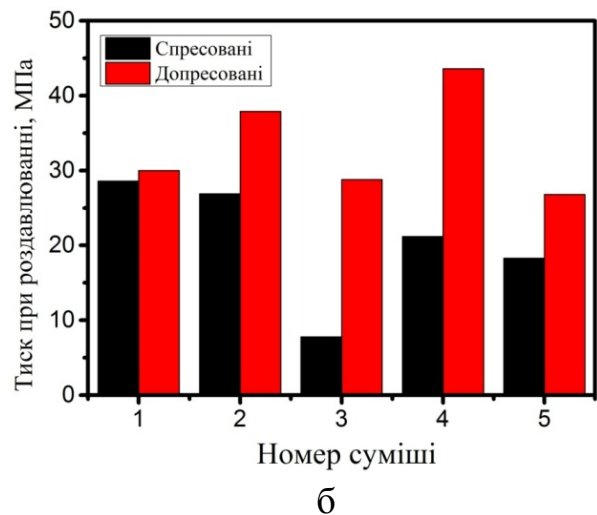
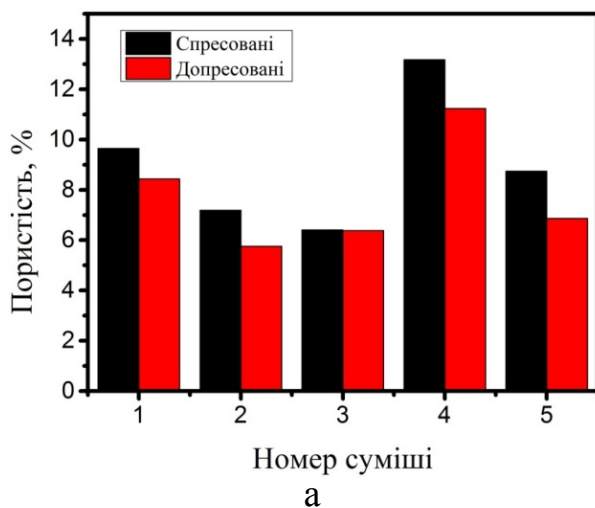


Рисунок 10 - Пористість вихідних і допресованих пресовок (а) та тиск при роздавлюванні (б) залежно від складу суміші (мас.%): 1) Fe - 99,4, Znстеарат - 0,6; 2) Fe - 98,4, графіту - 1,0, Znстеарат - 0,6; 3) Fe - 96,0, Гр - 4,0; 4) Fe - 94,4, Cr_3C_2 - 5,0, Znстеарат - 0,6; 5) Fe - 91,0, Cr_3C_2 - 5,0, Гр - 4,0.

Аналізували поведінку монофракційного залізного порошку (+50-200 мкм) та суміші того ж порошку з додаванням 5% порошку Cr_3C_2 фракції (+5-100 мкм) (рис. 11).

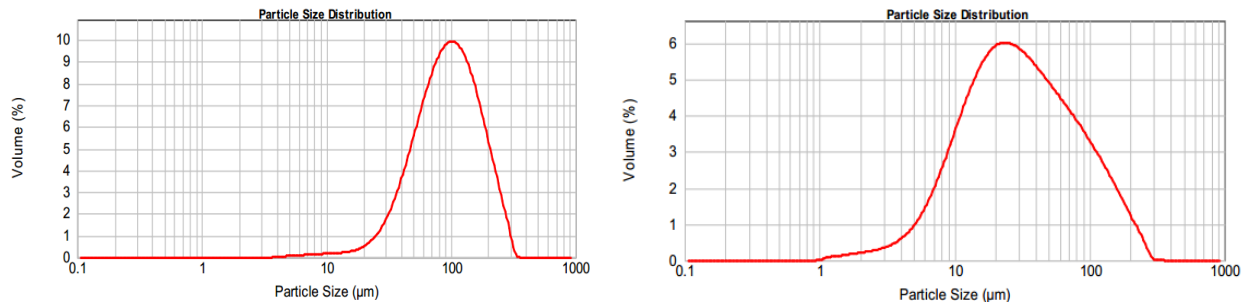


Рисунок 11 - Розподіл частинок порошків заліза (а) та карбіду хрому (б)

Для подальшого аналізу, із сукупності розмірів порошків виділяли центральну частину кривої розподілу з розрахунку покриття 90 % фракції. Обрану частину розділяли на 3 інтервали з позначенням від дрібного до крупного: I, II, III. Для кожного з інтервалів визначали середнє значення, яке використовувалось в розрахунках. Поряд з тим, визначали відносну кількість частинок кожного з інтервалів. Чисельні значення меж інтервалів, середніх значень та умовної кількості частинок в розрахунку на 1 грам суміші наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 - Значення меж інтервалів, середніх значень, та відносної кількості частинок на 1 грам суміші Fe-5% Cr_3C_2

Порошок	Інтервал	Верхня межа, мкм	Нижня межа, мкм	Середнє, мкм	Кількість часток
Fe	I	75	48	62	291 584
	II	130	75	102	88 707
	III	200	130	165	15 418
Cr_3C_2	I	18	5	12	2 452 025
	II	60	18	39	115 257
	III	113	60	86	5 762

Для аналізу залежності площі контакту від прикладеного навантаження використано рівняння Герца - загально прийнятий метод розв'язку контактних задач: $a = F^{\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{K} \frac{1}{r^*} \right)^{\frac{1}{3}}$, де a – радіус області дотику, м; F – сила, Н; K – ефективний модуль Юнга, Па; r^* - ефективний радіус двох частинок, м.

Для одержання зв'язку значень контактних площ та контактних напружень від тиску пресування, ввели поняття ефективної площі. Яка обчислювалась як площа квадрата, в який може бути вписаний максимальний за площею переріз частинки.

При перерахунку значень контактних напружень від прикладеного зовнішнього тиску одержали залежність, показану на рисунку 13.

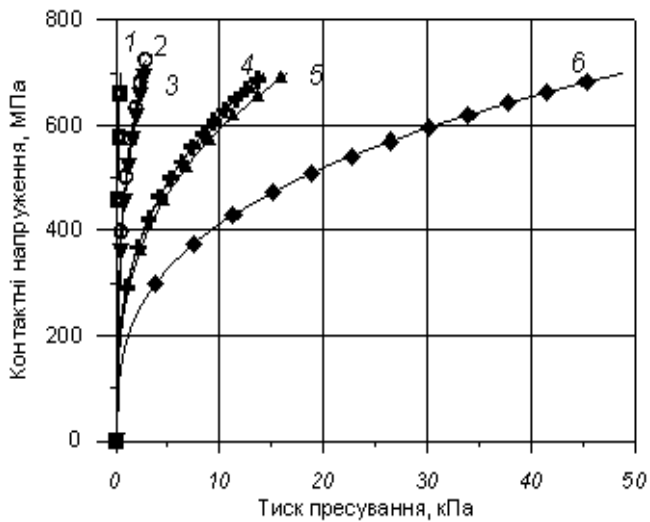


Рисунок 12 – Залежність напруження в контактній парі від прикладеного тиску: 1- Fe(I)-Cr₃C₂(II), 2- Cr₃C₂(I)-Cr₃C₂(II), 3 - Fe(I)-Cr₃C₂(I), 4 - Fe(III)-Cr₃C₂(I), 5 - Fe(I)-Fe(III), 6 - Fe(I)-Fe(I).

У свою чергу, це призводить до появи локально зміцнених зон на частинках заліза, що стримує подальше зближення центрів частинок та ущільнення пресовки на наступних етапах пресування та при повторному допресуванні.

З метою виключення зовнішнього контактного тертя було досліджено вплив зовнішнього (комбінованого) мастила та його реологічні властивості на ущільнення пресовок на основі заліза (рис. 13).

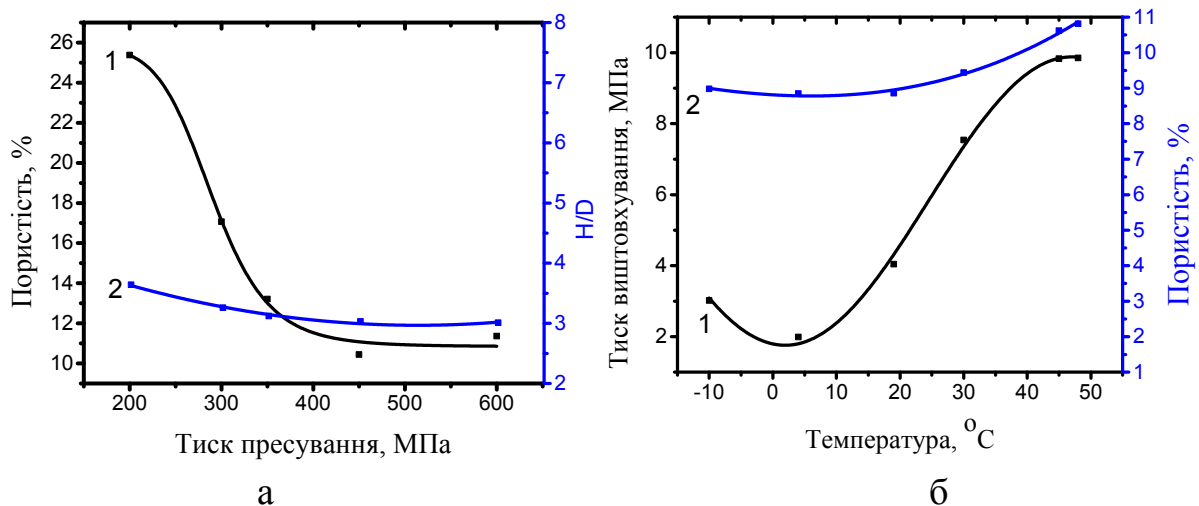


Рисунок 13 - Пористість пресовок, відношення їх висоти до діаметру (H/d) і тиск виштовхування в залежності від тиску допресування: а - при 23 °C з комбінованим мастилом б - при різних температурах з комбінованим мастилом

Встановлено вплив фізичного стану мастила на механічну взаємодію між матрицею і пресовкою, що дозволяє реалізувати механізм пластичної деформації

Одержані результати дозволяють стверджувати, що найбільш плавно контактні напруження наростають в парі частинок заліза з порівняно однаковими радіусами. В контактних парах, де присутні частинки карбіду хрому, контактні напруження наростають дуже швидко, що свідчить про достатньо малі площі контактних площадок. Швидке зростання контактних напружень при малих площах контакту, буде призводити до досягнення напружень межі плинності, переходу до пластичного деформування.

частинок металу по об'єму пресовки і зменшити зусилля виштовхування в 5 разів. Керування в'язкістю мастила та параметрами процесу ущільнення дозволяє реалізувати об'ємну пластичну деформацію пресовки, що забезпечує мінімальний тиск випресування і рівномірний розподіл щільності.

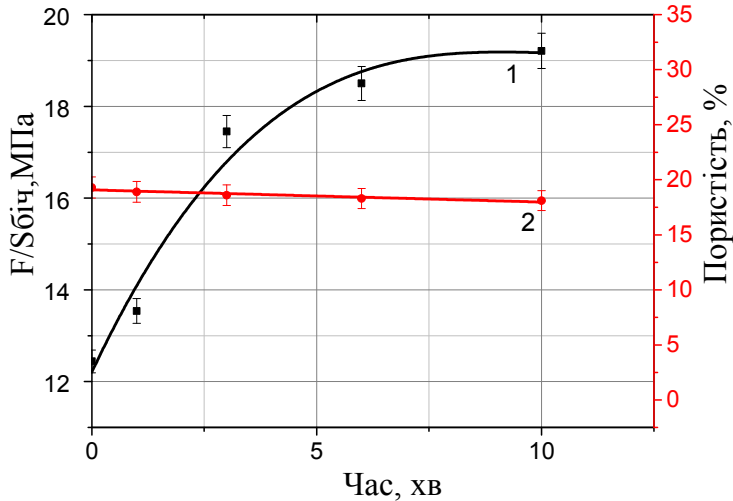


Рисунок 14 - Відношення зусилля виштовхування брикетів з прес-форми до площі бічної поверхні (1) і пористість (2) брикетів залежно від часу витримки в прес-формі під тиском 400 МПа.

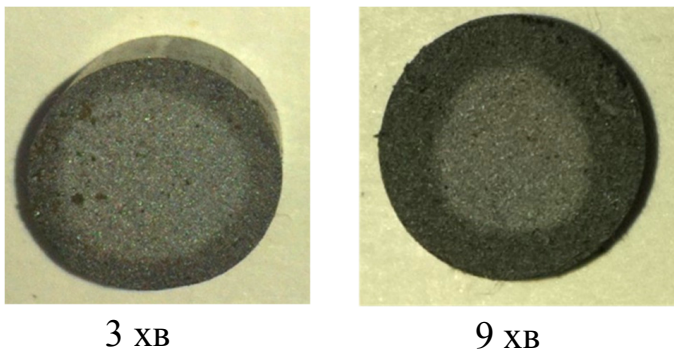


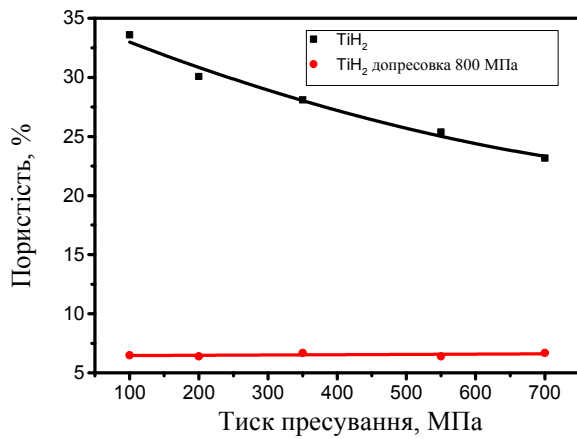
Рисунок 15 - Характерний вид фронту інфільтрації мастила в пресовку з порошку заліза при навантаженні 400 МПа при температурі 20 °С протягом 3 і 9 хв.

Дослідження впливу тривалості витримки під тиском на ущільнення і тиск виштовхування пресовок під час допресування показало, що із збільшенням часу витримки відбувається збільшення зовнішнього тертя (рис. 14), що обумовлено процесом інфільтрації мастила в пресовку і зменшенням шару мастила (рис. 15).

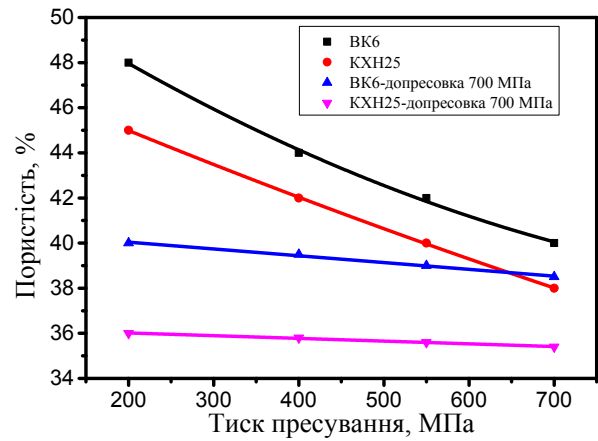
При цьому було встановлено, що швидкість просочування при навантаженні 400 МПа становить 0,5 мм/хв.

Таким чином, одним із принципів консолідації пресовок при допресуванні з нанесеним мастилом є необхідність виконання умов при яких $V_{\text{навантаж.}} > V_{\text{просочув.}}$. Для встановлення закономірностей впливу природи та розмірів частинок порошку на ущільнення при допресуванні досліджували процес допресування крихких порошків та сумішей, що складаються із крихких та пластичних частинок.

Допресування крихких порошків гідриду титану, показало, що виключення зовнішнього контактного тертя дозволяє знизити пористість до 5-6 % (рис. 17 а). Зменшення розміру частинок у твердосплавних сумішей привело до зростання поверхні контакту, що зменшує ущільненість і приводить розшарування частинок, що обумовлено вкладом пластичної складової (рис. 16 б).



а



б

Рисунок 16 – Залежність пористості від тиску пресування частинок різної природи при виключенні зовнішнього тертя при допресуванні: (а)гідрид титану, (б) тверді сплави

Досліджено процес допресування залізного порошку в умовах всебічного стискання в камері високого тиску (рис. 17). Встановлено, що в умовах всебічного стискання пресовки, ущільнення визначається внутрішнім тертям, що залежить від природи матеріалу та напрямку прикладання зусилля, що обумовлює зсувні деформації на периферії пресовок і забезпечує максимальну щільність та текстуру периферійної частини пресовки (рис. 18).

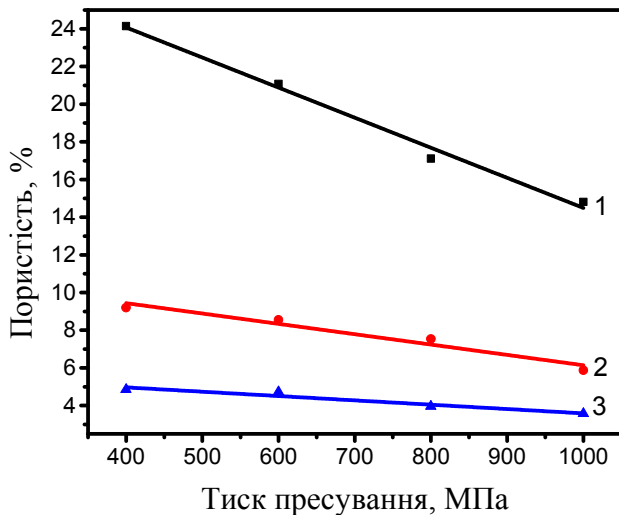


Рисунок 17 - Залежність пористості брикетів з порошку заліза від тиску пресування: в сталевий прес-формі (1), допресування їх в КВТ без відпалу (2) і їх допресування в КВТ після відпалу (3)

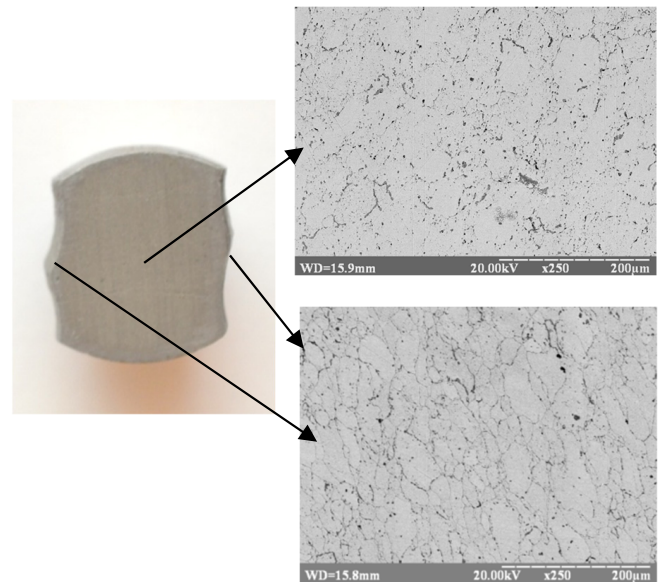


Рисунок 18 - Поздовжній перетин пресовки після відпалу і допресування в КВТ при 2500 кН та мікроструктура в центральній частині та на периферії пресовки

На підставі встановлених механізмів ущільнення порошків різної природи та розмірів, було застосовано допресування сумішей залізного порошку з крихкими дисперсними добавками кремнію, що дозволило отримати магнітно-м'який матеріал з високими магнітними характеристиками, що не реалізується традиційними металургійними методами (табл. 6).

Таблиця 6 – Щільність та магнітні характеристики залізних зразків з добавками кремнію, спечених при температурі 1300 °С, 1 годину.

Склад пресовок	Fe - 100	Fe - 95, Si - 5
Щільність допресованих пресовок, г/см ³	7,39	6,35
Щільність спечених в вакуумі пресовок, г/см ³	7,53	7,36
Втрата матеріалу ваги при спіканні, мас. %	0,5061	0,6958
Поверхневий вміст кремнію в зразках за даними спектрального аналізу, мас. %	0,28	4,84
Твердість, HRB	23	92
Питома намагніченість насичення, Гс·см ³ /г	150	165
Коерцитивна сила, А/м	475	310

У **четвертому розділі** досліджено процес вільного осадження пресовок на основі залізу. Показано, що максимальне ущільнення порошку можна досягти при використанні деформацій зсуву, що може бути реалізовано шляхом виключення опору стінок матриці радіальному переміщуванню матеріалу пресовок в умовах вільного осадження.

Встановлено, що зсувні деформації дозволяють отримати безпористий стан пресовок, при цьому величина зусилля, залежить від його напрямку відносно первинного пресування (рис. 19).

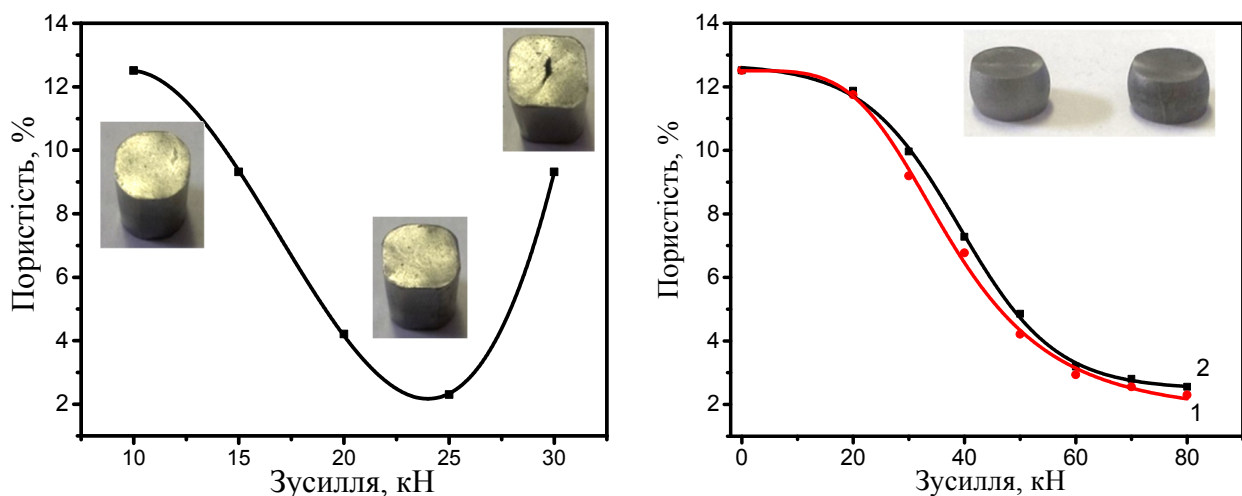


Рисунок 19 – Залежність пористості брикетів з порошку заліза в залежності від зусилля та напрямку вільного осадження: 1 - з мастилом, 2 - без змащення

Реалізація зсувних деформацій в процесі вільного осадження залежить від ступеня пластичності матеріалу та природи легуючих добавок, що змінюють ступінь ущільнення. Тому досліджували вільне осадження при різних температурах при зусиллі 200 кН, встановлено, що найменша пористість (1,5–2 %) спостерігається для зразків підданих осадці при кімнатній температурі, висока пластичність яких обумовлена попереднім відпалом. (рис. 20).

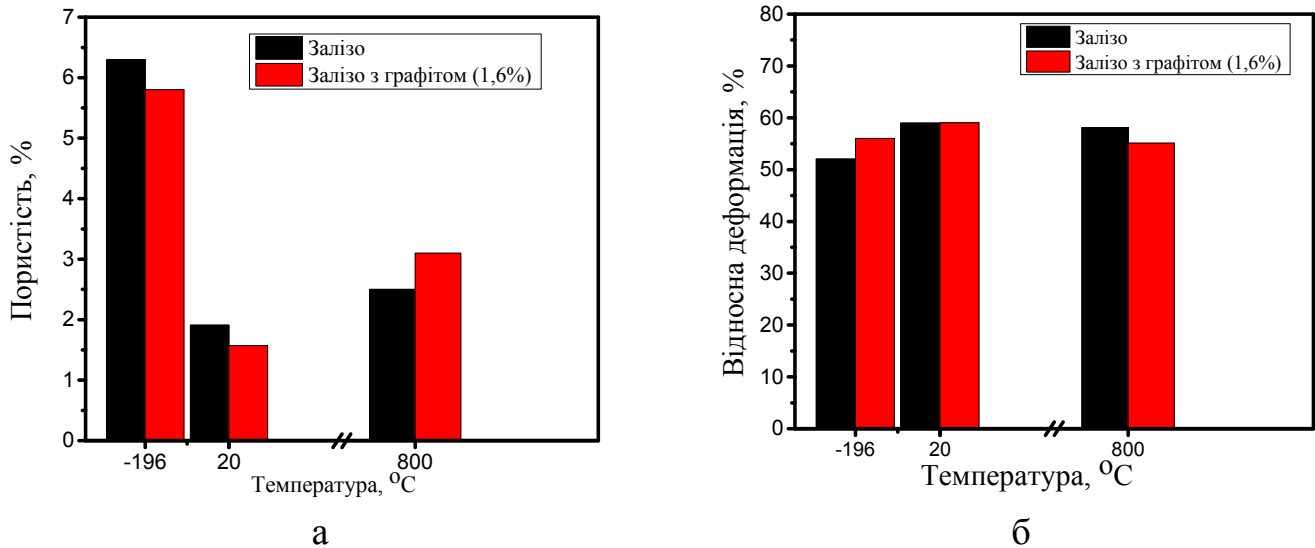


Рисунок 20 - Пористість (а) та відносна деформація (б) зразків при зусиллі вільного осадження 200 кН при температурах – 196, 20, та 800 °C.

Враховуючи, що ущільнення пресовок при вільному осадженні залежить від внутрішнього тертя, було досліджено ущільнення багатошарових матеріалів із різним розподілом графіту по шарах, що дозволило змінювати внутрішнє тертя і відповідно, ступінь зсувних деформацій в різних зонах (рис. 22).

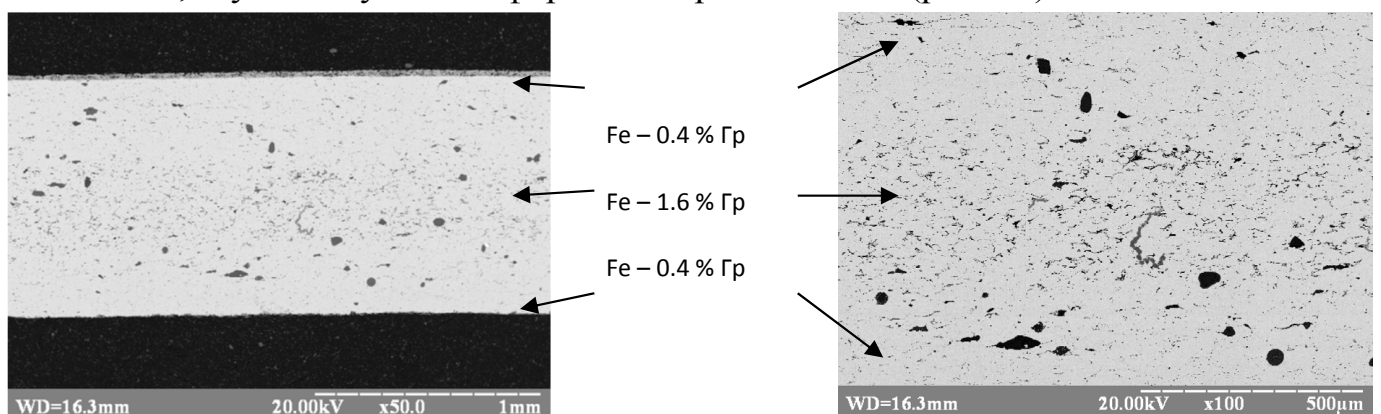


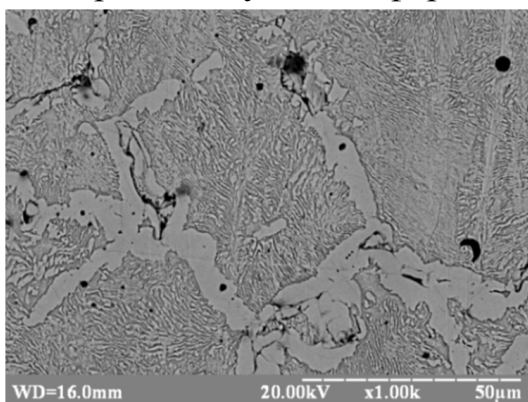
Рисунок 21 - Макроструктура тришарового залізо – графітового брикету після його осадки

В результаті досліджень показано можливість створення високощільних та високоміцних порошкових середньо- та високовуглецевих сталей і залізографітових матеріалів вільним осадженням без спікання шляхом реалізації

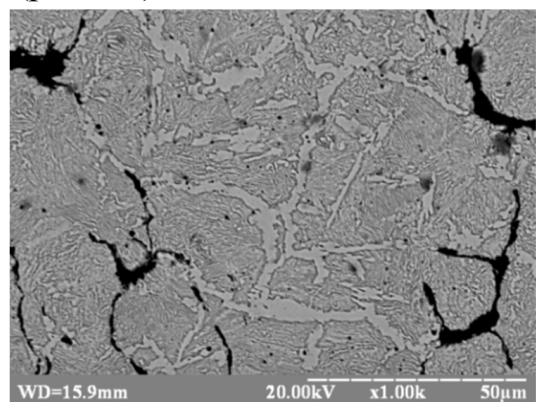
деформацій зсуву під час ущільнення та виключенням зовнішнього тертя при формуванні.

В п'ятому розділі наведено результати досліджень впливу термдеформаційного оброблення на процеси ущільнення, фазовий склад, мікроструктуру та властивості порошкових матеріалів. Враховуючи, що найбільше зсувні деформації реалізуються під час вільного кування заготовок, досліджували процес вільного торцевого гарячого кування порошкових матеріалів на основі заліза.

Було досліджено процеси фазо- та структуроутворення порошкових матеріалів з різним вмістом графіту, який забезпечував різне внутрішнє тертя і відповідно різний ступень деформації заготовок (рис. 22).



а



б

Рисунок 22 - Мікроструктура матеріалів на основі заліза із вмістом графіту 4,0 % після спікання (а) та після спікання и гарячого кування (б)

Встановлено, що в зразках, що містять велику кількість графіту кування приводить до збільшення твердості та міцності (табл. 7), що обумовлено виникненням нових контактів залізо – залізо внаслідок зсувних деформацій та фрагментацією зерен.

Таблиця 7 – Механічні властивості спечених та кованих матеріалів з різним вмістом графіту

Вміст графіту, %	Спечені					Ковані				
	σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	ε , %	Твердість, HRC	Мікро-тверд., ГПа	σ_{02} , МПа	σ_B , МПа	ε , %	Твердість, HRC	Мікро-тверд., ГПа
0	—	—	—	14,0–16,0	0,6–0,9	—	—	—	18,0–24,0	1,7–1,8
1,7	307	1186	35,2	14,3–16,0	1,8–2,3	279	1283	26,9	41,9–43,7	4,1–4,3
4,0	241	683	16,3	15,1–16,6	1,7–2,1	310	794	12,3	26,1–30,2	3,2–3,5
12,0	188	288	3,3	—	—	220	255	0,9	—	—

Дослідження процесу зношування зразків методом статичного сканування поверхні індентором показав, що ковані зразки мають менший коефіцієнт тертя та

більш рівномірний характер тертя без коливань (рис. 23).

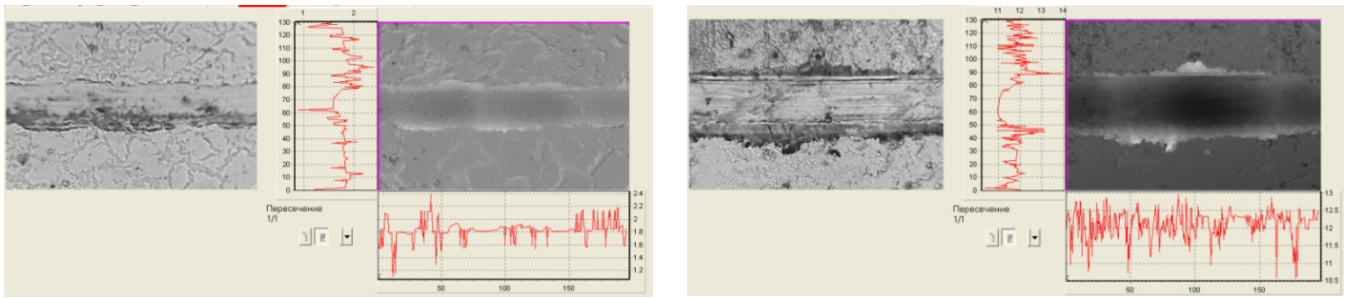
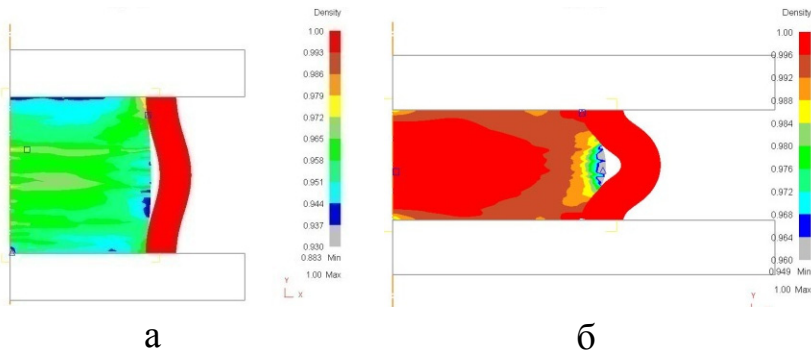


Рисунок 23 – Макроструктури поверхні, 2D топографії: а – кованого зразку з 1,7 % графіту, б – спеченого зразку з 1,7 % графіту

З метою встановлення закономірностей процесу ущільнення порошкових матеріалів в умовах вільного кування, було проведено моделювання поведінки пресовки на різних стадіях деформування. При цьому було використано сталеву обичайку, що регулює радіальне переміщення пресовки (рис. 24).



Встановлено відмінність розподілу відносної щільності в залежності від об'єму пор вихідної пресовки, що змінювалась попереднім обробленням пресовки. Досліджено процеси термодформаційного оброблення з можливістю керування дифузійними

процесами при куванні, що було реалізовано на прикладі системи Fe-Ti-C (рис. 25). Збільшення контактів в процесі кування приводить до підвищення механічних властивостей матеріалів до значень 680 – 720 МПа при збереженні пластичності.

На підставі встановлених механізмів ущільнення порошків в процесі вільного гарячого кування було створено композити із відходів стружки ШХ-15. Крім допресування, спресовані із стружки ШХ-15 брикети піддавали іншим видам оброблення перед гарячим вільним куванням: спіканню та вільному осадженню.

Дослідження фізико-механічних характеристик матеріалів на основі стружки після вільного гарячого кування показало їх відмінність залежно від видів попередньої обробки. Більш високу твердість та міцність при стисненні мають

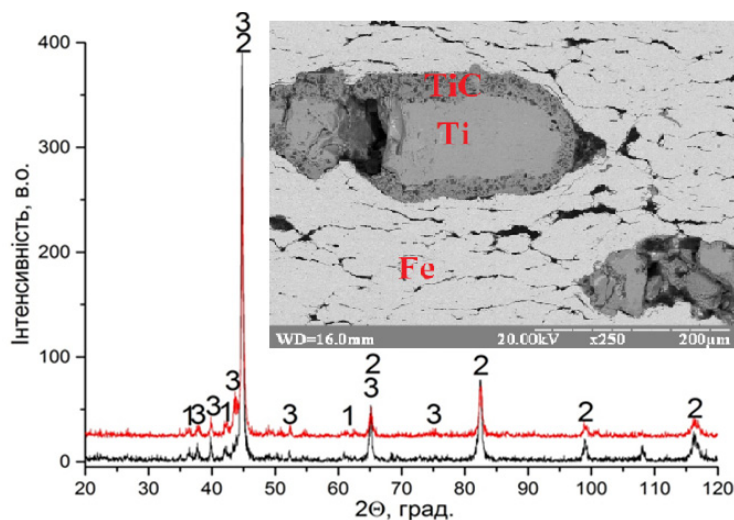


Рисунок 25 – Спектри рентгенівської дифракції та структура сплаву Fe (86%)–Ti(10%)–C(4%) після спікання та гарячого кування

що розташовуються по границях зерен, тому для створення направлених зв'язків, що забезпечують ідеальні контакти було використано метод 3 D друку, а саме селективного лазерного оплавлення частинок залізного порошку для створення різних типів структур каркасів з різним кутом орієнтації елементарних комірок в об'ємі пористого каркасу (рис. 26).

Каркаси мають загальний об'єм пор 78 – 79 %. Кут орієнтування елементарної комірки до площини зразку складає як для першого типу каркасу, так і для третього 45° , для другого типу каркасів кут орієнтування комірки становить 90° .

Таблиця 8 – Механічні характеристики пористих та просочених алюмінієм 3 D каркасів

Характеристика	Вихідний каркас			Просочений алюмінієм		
	Тип каркасу					
	1	2	3	1	2	3
Е, ГПа	20	23,9	17,2	56,5	57,8	66,2
σраз, МПа	—	—	—	117	113	125
σ02, МПа	14	42	16	8,3	6,0	6,1
KCV, Дж/м²	13	23	22	457,8	387,9	426,3

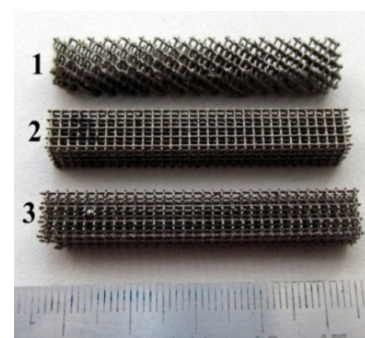


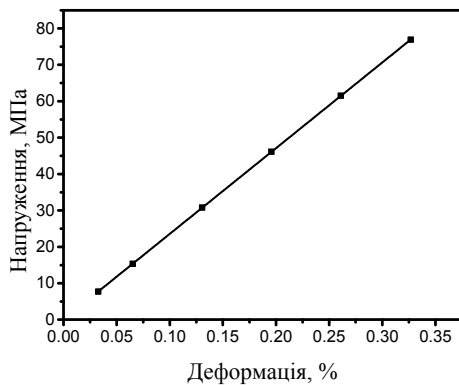
Рисунок 26 – Зображення каркасів, надрукованих методом SLM

Результати досліджень показали, що механічні характеристики каркасів залежать від кута орієнтації комірок відносно прикладеного зусилля деформації

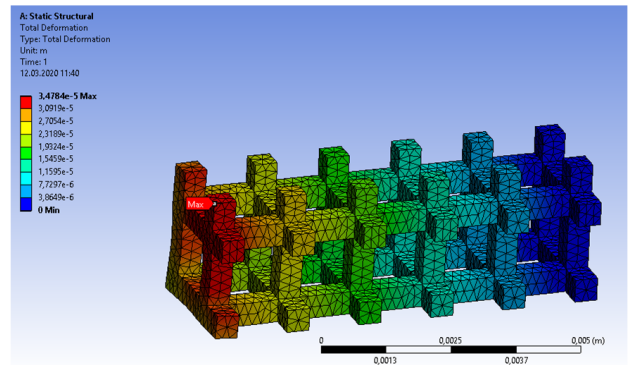
зразки, які піддавали попередньому вільному осадженню: твердість знаходиться в межах від 90-92 HRB до 14-16 HRC, а міцність при стисненні від 1450 до 1670 МПа, залежно від попередньої обробки.

В шостому розділі досліджено вплив хімічної та структурної досконалості пресовок на механічні властивості економнолегованих сталей та композитів. Однією з проблем формування структури порошкових матеріалів в процесі спікання є адсорбовані домішки,

(табл. 8). Для аналізу механічних характеристик та напружено-деформованого стану матеріалу було задано параметри 3D пористого залізного каркасу 2 типу з урахуванням розмірів утворюючих ґраток та об'єму пор.



а)



б)

Рисунок 27 – Діаграма напруження – деформація 3D моделі (а) та вигляд поля переміщень моделі (б)

За результатами моделювання було розраховано ефективне значення модуля

пружності за формулою:
$$E_{eff} = \frac{F}{S_{eff} \cdot \varepsilon_{eff}}$$
 де S_{eff} – ефективна площа:

$$S_{eff} = a \cdot b = 2.55 \cdot 2.55 = 6.5025 \text{ mm}^2$$

Відповідно величина модуля пружності складає 23,5 ГПа (рис. 27), що повністю відповідає експериментальним значенням і підтверджує створення структури з ідеальними зв'язками.

Для створення високощільної структури пористі каркаси просочували розплавом на основі алюмінію в умовах градієнту тиску. Оцінка механічних характеристик утворених композитів на основі 3 D каркасів показало, що найбільші властивості мають матеріали з орієнтацією елементарних комірок під кутом 45° до всіх трьох осей (табл. 8).

Аналіз фрактографічних досліджень зламів просочених 3 D каркасів показав, що всі композити руйнуються за механізмом в'язкого руйнування (рис. 29). На відміну від 2 та 3 типу каркасів, структура залізного каркасу 1 типу представляє собою витягнуті ямки в напрямку руйнування. Утворення витягнутих ямок викликано в результаті дії дотичних напружень при коалесценції мікропустот по схемі зсуву, що пов'язано із складною орієнтацією комірок каркасу 1 типу.

При цьому, як показали результати рентгенофазового аналізу фазовий склад отриманих композитів складається із твердих розчинів α -Fe, Al та Si, тобто в матеріалі відсутні інтерметалідні фази, наявність яких є характерним при отриманні матеріалів системи Fe–Al. На підставі проведених досліджень структуроутворення та механічних властивостей композитів із 3 D каркасів,

було створено композити на основі каркасів із порошків і відходів стружки (рис. 30).

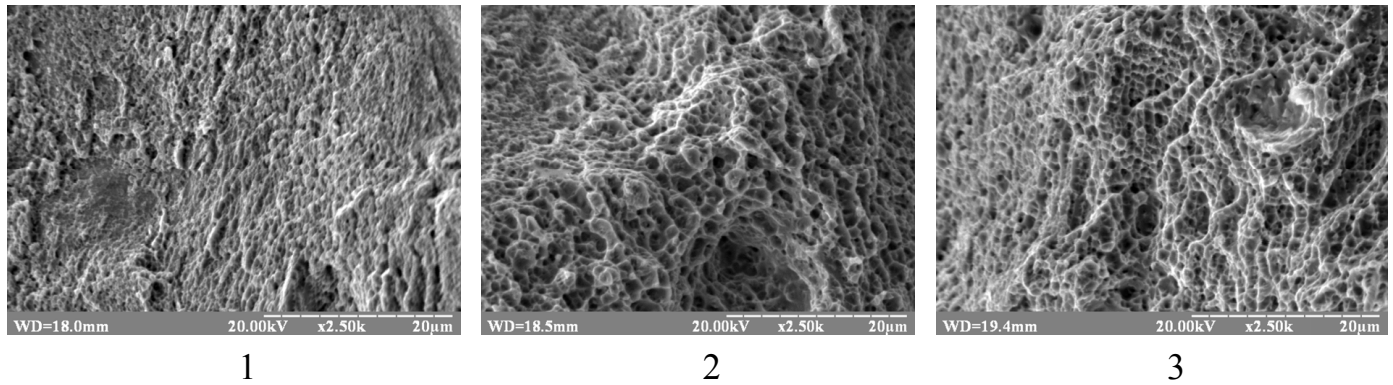


Рисунок 29 - Фрактографії зламу, просочених 3 D каркасів після розтягування

Фактична відсутність інтерметалідних фаз в структурі композиту обумовлено тим, що час просочування під вакуумом складає декілька секунд і компоненти не встигають прореагувати між собою. Відповідно, механічні характеристики таких каркасних матеріалів будуть вище, ніж у матеріалів отриманих просочуванням шляхом занурення у алюмінієвий розплав з тривалим часом витримки.

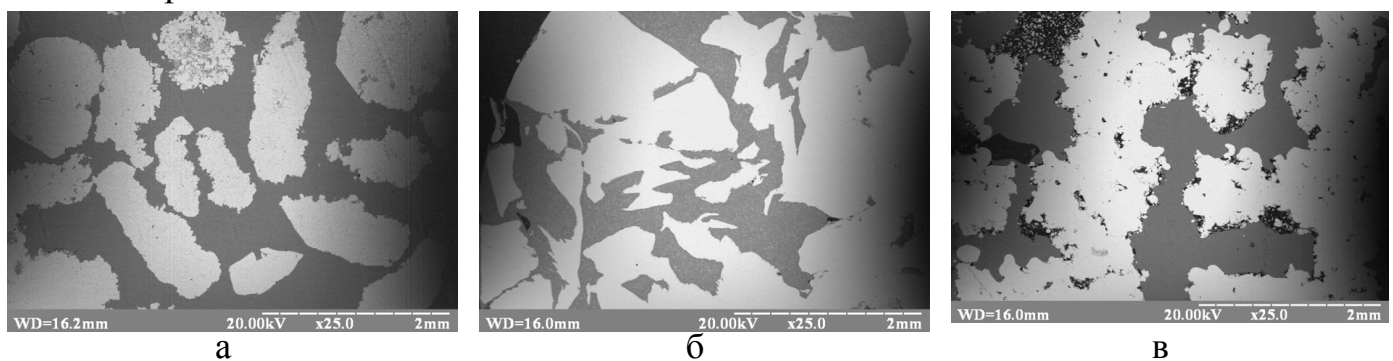


Рисунок 30 – Мікроструктура зразків після просочення розплавом АК7: а – на основі залізного порошку; б – на основі залізної стружки; в – 3D друк

Результати випробувань показали, що найбільшу межу міцності (близько 400 МПа) мають зразки отримані із 3D каркасів (табл. 9).

Таблиця 9 – Механічні характеристики матеріалів при стисненні

Тип каркасу	σ_{001} , МПа	σ_{02} , МПа	$\sigma_{ст}$, МПа	$\dot{\epsilon}$, %
Стружка	94	115,2	160,8	7,8
Порошок	36,7	46,8	106,5	9,2
3 D	55,1	68,1	400,1	31,8

На підставі проведених досліджень було створено, методом інфільтрації міддю пористого каркасу із відходів стружки сплаву ВНЖ, матеріал електротехнічного призначення. Результати випробувань показали, що розроблений композиційний матеріал має ерозійну стійкість на рівні стандартних псевдо сплавів, що мають таке ж співвідношення між вольфрамом та міддю.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. За результатами дослідження кінетики процесу формування покриттів міді та кобальту на залізному порошку встановлено концентрацію, температуру, рН розчину, що дозволяє формувати рівнотовщинні покриття (12 – 18 мкм) на частинках порошку заліза. Встановлено вплив покриття на ступінь ущільнення порошків заліза. Доведено, що покриття із пластичної міді дозволяють знизити пористість пресовок на 5 – 7 %. Процес ущільнення задовільно описується рівняннями пресування і природа покриття може бути оцінена шляхом аналізу даних рівнянь. Застосування порошків заліза з покриттям кобальту дозволяє сформувати порошковий магнітно-м'який матеріал з високою щільністю та максимально високими магнітними характеристиками, що відповідають параметрам магнітопроводів для роботи у змінних полях промислової частоти.

2. Досліджено процес повторного ущільнення сумішей порошків заліза з добавками частинок графіту та порошку із твердих непластичних карбиду хрому, гідриду титану, кремнію та гетерогенних сумішей порошків твердих сплавів (ВК, КХН). Встановлено, що допресування призводить до підвищення міцності пресовок, що обумовлено підвищенням щільності, збільшенням контактів між зернами, а також частковим подрібненням зерен. Встановлено основні фактори, що впливають на ефективність процесу консолідації пресовок, до яких відноситься наявність внутрішнього та зовнішнього мастила, відпал, що знімає деформаційне зміцнення, залишкові напруження в матеріалі та гранулометричний склад частинок суміші. Показано ефективність застосування допресування для створення порошкових магнітно-м'яких матеріалів на основі заліза з високим вмістом кремнію.

3. Встановлено можливість розробки гібридних схем ущільнення порошкових об'єктів шляхом поєднання пресування і допресування методами вільного осадження. Порівняння пористості доущільнених брикетів з порошку заліза в жорстких матрицях та брикетів доущільнених вільним осадженням показало більшу ефективність останнього, що обумовлено вкладом деформацій зсуву в процес ущільнення. Показана доцільність доущільнення вільним осадженням багатошарових брикетів на прикладі залізографітових зразків з різним вмістом графіту в шарах, що забезпечує градієнт властивостей.

4. Встановлено умови збільшення фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів на основі заліза при вільному гарячому куванні, шляхом регулювання сил внутрішнього та зовнішнього тертя і ступенем зсуву при використанні обичайки, що забезпечує усунення міжчастинкових пор і подрібнення зерен матеріалу при зсувній деформації. Встановлено, що використання сталевोї обичайки дозволяє регулювати

деформацію у радіальному напрямку порошкових композицій без їх руйнування при ущільненні гарячим куванням, що обумовлено високою взаємною адгезією зерен різного складу та дифузійним зв'язком у нових контактних зонах після кування. Результати досліджень показали перспективність переробки відходів металообробки із стружки ШХ-15 з використанням вільної гарячого кування із попереднім осадженням порошкових брикетів. Створено безпористі композити на основі стружки ШХ-15 із добавками різних компонентів з високою пластичністю, міцністю (1600 – 1700 МПа).

5. Показано можливість створення хімічної та фізичної досконалості міжзеренних границь шляхом орієнтування в просторі порових каналів каркасу отриманого селективним лазерним оплавленням. Встановлено вплив типу пористої 3D каркасної структури, а саме орієнтацію елементарних комірок на характер деформації. Результати випробувань механічних характеристик 3D пористих каркасів, показало, що орієнтація елементарних комірок в об'ємі матеріалу, визначає відмінність значень меж пропорційності, плинності, модуля пружності та ударної в'язкості.

6. Досліджено процеси інфільтрації пористих залізних каркасів отриманих методами порошкової металургії, в тому числі із застосуванням технологій 3D друку, розплавом на основі алюмінію в умовах градієнту тиску. Показано можливість створення композитів системи залізо–алюміній без утворення хімічних сполук, що забезпечується кінетикою процесу просочування. Доведено, що по мірі збільшення розміру пор, швидкість просочування зростає і при розмірі пор 400 мкм забезпечується повне просочування пресовок на висоту до 30 мм в умовах градієнту тиску.

7. В рамках дисертаційної роботи створено порошкові матеріали, що можуть широко використовуватися в якості конструкційних, триботехнічних, електротехнічних та матеріалів спеціального призначення. Розроблені магнітні матеріали на основі композиційних порошків для роботи у змінних полях промислової частоти, що мають низькі втрати при перемагнічуванні при збереженні високих значень магнітних характеристик. Розроблено матеріали для високоструменевих контактів на основі відходів металообробки важких сплавів просочених міддю, що мають ерозійну стійкість на рівні промислових псевдо сплавів. Відпрацьовано технологію отримання твердосплавних сердечників, що пройшли балістичні випробування, які підтвердили, що розроблені сердечники можуть застосовуватись для виробництва бронебійних боєприпасів стрілецької зброї.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Статті у фахових виданнях:

1. Мініцький А.В. Вплив типу порошку та кількості зв'язувального на магнітні властивості матеріалу на основі залізу // *Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки»*, 2010 – №4 – с. 150–153 *Особистий внесок здобувача*: отримання композитів на основі заліза, дослідження магнітних властивостей та структури матеріалів, аналіз та опис результатів
2. Мініцький А.В., Власова О.В., Мініцька Н.В. Основні тенденції розвитку порошкових магнітно-м'яких матеріалів // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць*. 2010, - № 9, - С.3-18. *Особистий внесок здобувача*: проаналізовано розвиток порошкових матеріалів на основі композиційних порошків
3. Мініцький А.В. Розробка композиційних порошкових матеріалів електротехнічного призначення // *Фізика і хімія твердого тіла*, 2014 –Т.15 –№4 – С.818–821 *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкових магнітно-м'яких матеріалів із композиційних порошків, вивчення структури та магнітних властивостей матеріалів, аналіз та опис результатів
4. Мініцький А.В., Власова О.В., Панасюк О.А., Мініцька Н.В. Отримання композиційних залізних порошків із покриттям нікель-фосфору для виготовлення магнітних матеріалів // *Вісник Кременчуцького національного університету ім.. М. Остроградського*. 2011, - Випуск 2(67), -ч.1., -С.79-82. *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкових магнітно-м'яких матеріалів із композиційних порошків, вивчення структури та магнітних властивостей матеріалів
5. Мініцький А.В., Власова О.В., Мініцька Н.В., Закономірності структуроутворення порошкових сплавів на основі міді електротехнічного призначення // *Металлофизика и новейшие технологии*, 2011 – т. 33. – с. 315–321 *Особистий внесок здобувача*: дослідження структури та електричних властивостей матеріалів (*входить до наукометричної бази даних Scopus*)
6. Власова О.В., Панасюк О.А., Апининская Л.М., Миницкий А.В., Вергелес Н.М., Затовский В.Г., Грипачевский А.Н., Куровский В.Я. Порошковые композиционные магнитомягкие материалы для электротехнической промышленности // *Электрические контакты и электроды: Труды Института пробл. Материаловедения И.Н. Францевича НАН Украины. Серия «Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия»*. Редкол. Минакова Р.В. (отв.ред) и др.– Киев, 2012.–с.101–107 *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкових магнітно-м'яких матеріалів із композиційних порошків, вивчення структури та магнітних властивостей матеріалів
7. Мініцький А.В., Власова О.В., Панасюк О.А. Магнітні та фізико-технологічні властивості залізного порошку з кобальт-фосфорним покриттям // *Металознавство та обробка металів*, 2009 – №3, с.48-52. *Особистий внесок*

здобувача: дослідження кінетики процесу хімічного осадження покриття кобальту на залізний порошок

8. Мініцький А.В., Власова О.В., Панасюк О.А. Магнітно-м'які матеріали на основі композиційних залізних порошків для роботи у змінних полях // *Металознавство та обробка металів*, 2012 – №1, с.27-33. *Особистий внесок здобувача*: отримання порошкових магнітно-м'яких матеріалів із композиційних порошків, вивчення структури та магнітних властивостей матеріалів

9. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Резервы уплотняемости порошка железа // *Науковий вісник ХДМА*, 2016. – №1(14) – с. 111–117 *Особистий внесок здобувача*: вивчення процесу допресування пресовок на основі залізу

10. Мініцький А.В., Сосновський Л.О., Мініцька Н.В.. Вплив технологічних факторів на процес допресовки порошкових брикетів на основі заліза // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк*, 2016. – №56. – с. 40–43 *Особистий внесок здобувача*: вивчення процесу допресування пресовок на основі залізу

11. Мініцький А.В., Сидоренко Б.О., Бесарабець Ю.Й. Вплив зовнішнього контактного тертя на процес допресовки порошкових матеріалів на основі заліза // *Проблем тертя та зношування*, 2016 – №1 (70). – с. 150–154 *Особистий внесок здобувача*: вивчення процесу допресування пресовок на основі залізу

12. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Допрессовка брикетов из смесей на основе порошка железа // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк*, 2016. – №54. – с. 220–225 *Особистий внесок здобувача*: вивчення процесу допресування пресовок на основі залізу

13. Minitskii, A.V., Loboda, P.I. The Infiltration of Lubricants in to a Porous Briquette, When Compacting // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 55, Issue 11-12, 1 March 2017, Pages 640-643 <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9850-3> *Особистий внесок здобувача*: вивчення процесу інфільтрації мастила в пресовки на основі залізу при допресуванні (входить до наукометричної бази даних Scopus)

14. Minitskii, A.V., Loboda, P.I. Alternative Method for Determining Compressibility of Powder Systems // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* Volume 56, Issue 7-8 December 2017, Pages. 424–429 <https://doi.org/10.1007/s11106-017-9912-6> *Особистий внесок здобувача*: розробка методики визначення ущільненості порошкових сумішей (входить до наукометричної бази даних Scopus)

15. Minitskii, A.V., Loboda, P.I. Pressing of long-length pellets from titanium hydride powder // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 57, Nos. 3-4, July 2018, Pages 138-143 <https://doi.org/10.1007/s11106-018-9961-5> *Особистий внесок здобувача*: отримання довгомірних пресовок на основі гідриду титану (входить до наукометричної бази даних Scopus)

16. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Определение возможности изготовления вертикальным прессованием длинномерных заготовок из порошка гидрида титана // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк*, 2015. №50. – С. 133–136 *Особистий внесок здобувача*: отримання довгомірних пресовок на основі гідриду титану

17. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Божко А.В. Використання деревини в якості оболонки для сухого ізостатичного пресування // *Восточно-Европейский журнал передових технологий*, 2014. – № 2. – с. 44–47 *Особистий внесок здобувача*: вивчення процесу ущільнення пресовок на основі заліза в умовах ізостатичного пресування

18. Minitskii A.V., Sosnovsii L. A., Loboda P.I., Kvitkovskii D.D. Encapsulation of Powder Mixtures with Frozen Fluids by Pressing// *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, Volume 58, Nos.3-4, July 2019, Pages 243–247 <https://doi.org/10.1007/s11106-019-00070-3> *Особистий внесок здобувача*: отримання капсульованих пресовок із порошкових сумішей (входить до наукометричної бази даних Scopus)

19. Сосновский Л.А., Власова О.В., Миницкий А.В. Исследование особенностей прессования и вакуумного спекания порошковой смеси железо-кремний // *Электрические контакты и электроды: Труды Института пробл. Материаловедения И.Н. Францевича НАН Украины. Серия «Композиционные, слоистые и градиентные материалы и покрытия»*. Редкол. Гречанюк Н.И. (отв.ред) и др.– Киев, 2018.–с.89–98 *Особистий внесок здобувача*: дослідження магнітних характеристик матеріалів на основі залізо - кремній

20. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Быков А.И., Лобода П.И. Процессы вторичного уплотнения брикетов на основепорошка железа // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2017. –№58. – с. 248–254 *Особистий внесок здобувача*: отримання пресовок на основі заліза методом вільного осадження та вивчення структури

21. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И., Бесарабець Ю.Й. Вплив технологічних параметрів на процес вільної осадки порошкових матеріалів на основі залізу // *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2019. –№65. – с. 183–188 *Особистий внесок здобувача*: отримання пресовок на основі заліза методом вільного осадження та вивчення структури

22. Мініцький А.В., Сисоєв М.О. Поверхневе термічне оброблення порошкових залізвуглецевих сплавів // *Металознавство та обробка металів*, 2015. – №1. – С. 30–34 *Особистий внесок здобувача*: вивчення структури та механічних властивостей пресовок після обробки електронним променем

23. Мініцький А.В., Сисоєв М.О., Мініцька Н.В. Вплив часу поверхневого термічного оброблення на структуру порошкових залізвуглецевих сплавів // *Металознавство та обробка металів*, 2016. – №1.– с. 3–6 *Особистий внесок здобувача*: вивчення структури та механічних властивостей пресовок після обробки електронним променем

24. Охрименко О.О., Мініцький А.В., Сисоєв М.О., Мініцька Н.В. Поверхневе зміцнення порошкових залізвуглецевих сплавів // *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*, 2018, – №176. – с. 30–35 *Особистий внесок здобувача*: вивчення структури та механічних властивостей пресовок після обробки електронним променем

25. Мініцький А.В., Биба Є.Г., Мініцька Н.В., Власова О.В., Ведель Д.В. Розробка вольфрамідних сильнострумових контактів на основі відходів металообробки // *Металознавство та обробка металів*, 2019. – №4.– с.53 – 60 *Особистий внесок здобувача*: вивчення структури та електричних властивостей матеріалів

26. Minitsky A. Byba Ye., Minitska N., Radchuk S. A study of the structure and properties of materials based on an iron – copper composite powder // *Eastern-european Jornal of enterprise technologies* 2019. – № 2/12 (98). – с. 44–55 <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.164017> *Особистий внесок здобувача*: вивчення кінетики процесу осадження міді на залізний порошок та дослідження ущільненості композиційних порошків (входить до наукометричної бази даних Scopus)

27. Loboda P.I., Minitsky A.V., BybaYe.G., Sysoev M.O., Radchuk S.V. Effect of the Porous Skeletal Iron Structure on the Infiltration of Aluminum Melts // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics* Volume 58, Nos.11-12, March 2020, Pages 651–657. <https://doi.org/10.1007/s11106-020-00121-0> *Особистий внесок здобувача*: проведення інфільтрації пористих каркасів розплавом алюмінію та вивчення структури композитів (входить до наукометричної бази даних Scopus)

28. Миницкий А.В., Лобода П.И., Евич Я.И., Закиев И.М. Горячая свободная ковка порошковых брикетов на основе железа // *Порошковая металлургия*, 2020. - №5/6. – С. 68 – 75 *Особистий внесок здобувача*: проведення термдеформаційного оброблення пресовок на основі заліза з різним вмістом графіту, дослідження структури матеріалів (входить до наукометричної бази даних Scopus)

Патенти на корисну модель:

29. Спосіб отримання порошкового магнітном'якого матеріалу на основі композиційного залізного порошку. Патент України №80083 МПК(2013.01), С25С 1/00, С22С 33/02 (2006.01), Заявл. 06.12.2012, Бюл. №9, 2013 р, Опубл. 13.05.2013. *Особистий внесок здобувача*: отримання композиційного порошку та визначення магнітних характеристик матеріалу

30. Спосіб виготовлення капсульованих порошкових брикетів. Патент України №100664, МПК В22F/02 (2006.01)., Бюл. № 15, Опубл. 10.08.2015 *Особистий внесок здобувача*: отримання капсульованих пресовок із порошкових сумішей

31. Спосіб отримання твердих сплавів. Патент України №131797 МПК С01В 32/949 (2017.01) u201809189 Заявл. 07.09.2018 р., Бюл. №2, Опубл. 25.01.2019 *Особистий внесок здобувача*: проведення термічного оброблення твердосплавних зразків

Доповіді на конференціях:

32. Маслюк В.А., Панасюк О.А., Миницкий А.В., Апининская Л.М., Вергелес Н.М. Влияние плакирования железного порошка на антикоррозионные свойства порошковых магнитно-мягких материалов// Сб. докладов “Порошковая металлургия в автотракторном машиностроении. Сварка и резка материалов. Материалы, технологии и оборудование для нанесения функциональных защитных покрытий”. 26–30 марта 2007 г., Минск, Беларусь. *Особистий внесок здобувача:* отримання плакованих порошків на основі заліза.
33. O. Panasyuk, V. Maslyuk, A. Minitskii, V. Lulko, O. Vlassova Powder composite soft magnetic materials. Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress&Exhibition EuroPM2007.– Toulouse, France, 2007.- 1 (3) – P. 347-351 *Особистий внесок здобувача:* отримання плакованих порошків на основі заліза та дослідження магнітних властивостей матеріалів
34. Panasyuk O.A., Baglyuk G.A., Kurovsii V.Ya., Vlasova O.V., Minitskii A.V. Influence of the type of deformation treatment on the formation of the magnetic properties of iron-based powder materials. Proceedings of the Euro International Powder Metallurgy Congress and Exhibition, EuroPM 2008 Shrewsbury, England (2008) –3– P. 223-226 *Особистий внесок здобувача:* отримано матеріали на основі композиційних порошків та вивчено магнітні властивості після деформаційної обробки.
35. Панасюк О.А., Власова О.В., Миницкий А.В., Апининская Л.М., Вергелес Н.М. Влияние термической обработки на структуру и магнитные свойства сплава железо-кобальт. Тр. второго международного научно-практического семинара «Новые материалы и изделия из металлических порошков. Технология. Производство. Применение» 17-19 июня 2008г, г. Йошкар-Ола, Россия, Республика Марий Эл. *Особистий внесок здобувача:* проведено плакування залізного порошку кобальтом та досліджено магнітні властивості.
36. Панасюк О.А., Напара-Волгина С.Г., Миницкий А.В., Апининская Л.М., Власова О.В.. Влияние бора на структуру и магнитные свойства порошковых Fe-Co-P материалов. Тр. пятой международной конференции «Материалы и покрытия в экстремальных условиях» 22–26 вересня 2008 р., Крим, Украина. *Особистий внесок здобувача:* проведено плакування залізного порошку кобальтом, легування бором та досліджено магнітні властивості.
37. Панасюк О.А., Маслюк В.А., Власова О.В., Миницкий А.В., Куровский В.Я., Люлько В.Г. Порошковые слоистые магнитно-мягкие материалы с анизотропными свойствами. Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка. В 2 ч. Ч. 2 матер. междунар. симп., пров. в рамках 12-й межд. выставки «Порошковая металлургия-2009», Минск, Беларусь, 25–27 марта 2009 г. *Особистий внесок здобувача:* дослідження магнітних властивостей композитів.
38. Panasyuk O.A., Vlasova O.V., Minitskii A.V. Influence of the sintering atmosphere on the magnetic properties of a powder soft magnetic material on the base of Fe-Co-P-B. International Conference on Sintering 2009, September 7-11, 2009, Kyiv, Ukraine.

Особистий внесок здобувача: досліджено процес спікання матеріалів на основі плакованих порошків.

39. Мініцький А.В., Солонуха Ю.С. Вплив режимів плакування порошку на магнітні характеристики матеріалів на основі заліза. Тр. Міжнародн. Науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах», Київ 5–6 листопада 2012 р. *Особистий внесок здобувача:* отримано плакований порошок, досліджено кінетику процесу плакування.

40. Мініцький А.В., Ілліних О.О., Сидоренко Б.О. Вплив технологічних параметрів на процес допресовки сумішей на основі заліза. Тр. VI Міжнародної науково-технічної конференції «Новые материалы и технологии в машиностроении», Київ, 21-22 травня 2014 р. *Особистий внесок здобувача:* проведено допресування пресовок на основі заліза.

41. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. К вопросу о методике полного выявления потенциала уплотняемости железного порошка. Матеріали 5-тої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 01 -03 жовтня, 2014 року, Херсон, Україна. *Особистий внесок здобувача:* проведено допресування пресовок на основі заліза.

42. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Исследование прессования порошка гидрида титана. 5-я Международная конференция «HighMatTech», 5-8 октября, 2015 года, Киев, Украина. *Особистий внесок здобувача:* проведено допресування пресовок на гідриду титана.

43. Миницкий А.В., Затовский В.Г., Лобода П.И. Интегрированные процессы: прессование и спекание, взаимодополняемость и взаимозаменяемость. 5-я Международная конференция «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», 24-25 мая, 2016, Київ, Україна. *Особистий внесок здобувача:* проведено допресування пресовок на основі заліза.

44. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Допрессовка брикетов из смесей на основе порошка железа. Международная научно - практическая конференция «Реологические модели и процессы деформирования структурно - неоднородных материалов» 30.05 – 03.06 2016 года, Луцк, Україна. *Особистий внесок здобувача:* проведено допресування та вільне осаджування пресовок на основі заліза.

45. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Компактирование - капсулирование прессованием с замороженным флюидом. Девятая международная конференция «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследование, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий», 19-20 августа, 2016 года Коблево, Украина. *Особистий внесок здобувача:* отримання капсульованих пресовок із порошкових сумішей.

46. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Быков А.И., Лобода П.И. Процессы вторичного уплотнения брикетов на основе порошка железа. Міжнародна науково-практична конференція «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: теоретические и экспериментальные основы технологий изготовления», 01.06.2017

р, Луцьк, Україна. *Особистий внесок здобувача*: проведено допресування та вільне осаджування пресовок на основі заліза.

47. Степанов О.В., Мініцький А.В., Река В.В. Комп'ютерне моделювання етапу пружної деформації при пресуванні порошкових об'єктів // Тр. Міжнародн. Науково-технічної конференції «Матеріали для роботи в екстремальних умовах», Київ 2017 р. *Особистий внесок здобувача*: проведено гранулометричний аналіз порошків.

48. Миницкий А.В., Сосновский Л.А., Лобода П.И. Прессование твердосплавных смесей. 6-я Международная конференция «Материаловедение тугоплавких соединений и композитов», 22-24 мая, 2018, Київ, Україна. *Особистий внесок здобувача*: проведено допресування пресовок із твердосплавних сумішей.

49. Baglyuk G.A., Vlasova O.V., Minitskii A.V. Powder layered soft magnetic material. The 10-th international conference “Advanced materials and technologies: from idea to market”, Ningbo, China, 24-26 October 2018. *Особистий внесок здобувача*: досліджено процес спікання матеріалів на основі плакованих порошків.

50. Мініцький А.В., Пузанов Д.Є., Радчук С.В., Мініцька Н.В. Розробка композиційних матеріалів на основі пористих каркасів із відходів сплаву ВНЖ просочених міддю. Новые материалы и технологии в машиностроении: Тр. XI Міжнародної науково-технічної конференції, Київ, 30-31 травня 2019 р. *Особистий внесок здобувача*: досліджено структуру та електричні властивості композитів.

51. Миницкий А.В., Лобода П.И., Биба Є.Г. Горяча вільна ковка порошкових матеріалів. XIV Міжнародної науково-технічної конференції «Нові сталі і сплави і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів», 8–10 жовтня, 2019 Запоріжжя, Україна. *Особистий внесок здобувача*: проведення вільної гарячого кування пресовок на основі залізного порошку.

52. Миницкий А.В., Лобода П.И., Мініцька Н.В. Застосування вільної гарячої ковки для створення композитів із відходів металообробки. XI Міжнародна науково-технічна конференція «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії», присвячена 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, 20–22 листопада, 2019, Харків, Україна. *Особистий внесок здобувача*: проведення вільної гарячого кування пресовок на основі залізного порошку.

Анотація

Мініцький А.В. Створення фізико-технологічних основ виготовлення високощільних порошкових матеріалів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.06 – «Порошкова металургія та композиційні матеріали» – (05 – Технічні науки). – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Київ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми розробки та виготовлення високощільних економно легированих порошкових матеріалів на основі заліза з високими фізико-механічними характеристиками для роботи в екстремальних умовах експлуатації.

Проведено комплексні дослідження процесу плакування залізного порошку міддю та кобальтом та встановлено залежність фізичних та технологічних характеристик порошку від товщини плівки покриття. Досліджено вплив умов навантаження, природи та фізичних властивостей порошків на ступінь ущільнення під час пресування. Досліджено вплив термодформаційного оброблення на процеси ущільнення, фазовий склад, мікроструктуру та властивості порошкових матеріалів. Досліджено вплив хімічної та структурної досконалості пресовок на механічні властивості економно легированих сталей та композитів. Вперше встановлено вплив типу пористої 3D каркасної структури, а саме орієнтацію елементарних комірок, на характер деформації матеріалів.

Розроблено матеріали для високоструменевих контактів на основі відходів металообробки важких сплавів просочених міддю, що мають ерозійну стійкість на рівні промислових псевдо сплавів. Відпрацьовано технологію отримання твердосплавних сердечників, що пройшли балістичні випробування, які підтвердили, що розроблені сердечники можуть застосовуватись для виробництва бронебійних боєприпасів стрілецької зброї.

Ключові слова: порошкові матеріали, композиційні порошки, пресування, ущільнення, допресування, пористість, термодформаційне оброблення, вільне кування, осадження, інфільтрація, 3D друк, пористі каркаси, відходи металообробки

Аннотація

Миницкий А.В. Создание физико-технологических основ изготовления высокоплотных порошковых материалов - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.06 - «Порошковая металлургия и композиционные материалы» (05 - Технические науки). Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского", Киев, 2020.

Диссертация посвящена решению важной научно-технической проблемы разработки и изготовления высокоплотных экономно легированных порошковых

материалов на основе железа с высокими физико-механическими характеристиками для работы в экстремальных условиях эксплуатации.

Проведены комплексные исследования процесса плакирования железного порошка медью и кобальтом и установлена зависимость физических и технологических характеристик порошка от толщины пленки покрытия. Исследовано влияние условий нагрузки, природы и физических свойств порошков на степень уплотнения при прессовании. Исследовано влияние термомодеформационной обработки на процессы уплотнения, фазовый состав, микроструктуру и свойства порошковых материалов. Исследовано влияние химического и структурного совершенства прессовок на механические свойства экономно легированных сталей и композитов. Впервые установлено влияние типа пористой 3D каркасной структуры, а именно ориентацию элементарных ячеек, на характер деформации материалов.

Разработаны материалы для высокотоковых контактов на основе отходов металлообработки тяжелых сплавов пропитанных медью, имеющих эрозионную устойчивость на уровне промышленных псевдо сплавов. Отработана технология получения твердосплавных сердечников, прошедших баллистические испытания, которые подтвердили, что разработанные сердечники могут применяться для производства бронебойных боеприпасов стрелкового оружия.

Ключевые слова: порошковые материалы, композиционные порошки, прессование, уплотнение, допрессовка, пористость, термомодеформационная обработка, свободная ковка, осаждение, инфильтрация, 3D печать, пористые каркасы, отходы металлообработки

Summary

Minitsky A.V. Development of physical and technological basics for production of high-density powder materials— Manuscript of qualification scientific work.

The dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.16.06 – “Powder metallurgy and composite materials” – (05 – Technical Sciences). – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem of development and manufacturing of high-density economically alloyed powder materials on the basis of iron with high physical and mechanical characteristics for application under extreme conditions of operation.

Comprehensive studies of the plating process of iron powders by copper and cobalt are conducted, and the dependence of physical and technological characteristics of the

powders on the coating film thickness is found out. The main parameters which affect the process of deposition of the coatings on iron powder particles are determined. The possibility to control the coating thickness (in the range of 12–20 μm) by changing the deposition kinetics is found out. The process of compaction of composite iron powders in the conditions of static pressing is analyzed by means of the mathematical equations which describe the density dependences on the pressure of compaction. The possibility of fabrication of materials for electrotechnical application on the base of composite powders of the Fe–Co system with high density and high magnetic characteristics with low total losses upon magnetization reversal at a level of 19–21 W/kg is shown, that allows to use the materials for production of magnetic circuits designed for operation in both constant and variable fields of industrial frequency.

The influence of loading conditions, nature and physical properties of the powders on the degree of compaction during pressing is studied. The process of second compaction of the powder systems in the conditions of static pressing is investigated, and the main factors affecting the efficiency of compact densification are revealed. It is found out that the second compaction of iron–graphite mixes enhances the strength of the compacts by 5 times, that is caused both by higher density and increase in the surface area of iron–iron contacts.

The possibility of manufacturing long semi-products by static pressing and second compaction of powder mixtures of brittle and ductile materials, including hard alloys WC-Co and $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-Ni}$, is found out. The process of second compaction of iron powders under conditions of triaxial compression in a high-pressure chamber is investigated; it is found out that the compact densification depends on the internal friction of particles and the forces in the axial and radial directions.

For the first time, the efficiency of obtaining high-density and high-strength Fe-based powder materials by free deposition is shown, which is explained by the contribution of shear deformations into the densification process. The expediency of additional densification by free deposition of multilayer briquettes on the example of iron-graphite samples with different content of graphite in layers is shown, which provides a gradient of properties.

The effect of thermomechanical treatment on the densification processes, phase composition, microstructure and properties of powder materials is investigated. It is shown that hot free forging of powder systems can be used to expand the range of composites from metal and cermet powders.

The results of research showed the prospects of processing metal waste from shavings of ‘ИХ-15’ steel using free hot forging with previous deposition of powder

briquettes. Non-porous composites based on 'IIIX-15' shavings and various components added with high strength (1600–1700 MPa) and ductility have been fabricated.

The influence of chemical and structural perfection of compacts on the mechanical properties of economically alloyed steels and composites is investigated. For the first time, the influence of the type of porous 3D frame structure, namely the orientation of unit cells, on the nature of deformation of materials is determined.

The processes of infiltration of porous iron frames produced by powder metallurgy methods (including 3D printing technologies) by Al-based melt under conditions with a pressure gradient are studied. The minimum size of pores (400 μm), which provides full filling of a porous framework with Al-based melt, is determined.

As a part of the dissertation, powder materials have been developed and fabricated that can be widely used as structural, tribotechnical, electrical and special purpose materials. Magnetic materials based on the composite powders have been developed for operation in alternating fields of industrial frequency, which have low losses upon magnetization reversal and at the same time retain high magnetic characteristics. The materials for high-current contacts based on metalworking waste of heavy alloys infiltrated by copper with erosion resistance at the level of industrial pseudo-alloys have been developed. A technology of producing carbide cores is worked out; these cores passed ballistic tests which confirmed that they can be used for the production of armor-piercing ammunition for small arms.

Key words: powder materials, composite powders, compaction, densification, second compaction, porosity, thermomechanical treatment, free forging, deposition, infiltration, 3D printing, porous frames, metalworking waste.

Підписано до друку 18.12.2020. Формат 60х90¹/16
Ум. друк. арк. 1,8. Обл-вид. арк 1,8
Наклад 100 прим. Замовлення № 601
Віддруковано на різнографі в видавничому центрі “Принт-центр”
04053, м. Київ, вул. Січових Стрільців, 26А
Тел./факс: 486-50-88, 332-41-10, 277-40-16
<http://www.printc.com.ua> E-mail printcentr@ukr.net